Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali

Tesi di Laurea Triennale

"Influenza delle proprietà termo fisiche delle componenti vetrate sulle prestazioni dell'involucro edilizio"

Relatore: Prof. Ing. Andrea Gasparella

Correlatore: Ing. Giovanni Pernigotto

Laureando: Mattia Baggio

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

INDICE

SOMMARIO.....5

INTRODUZIONE.....7

CAPITOLO 1. CERTIFICAZIONE ED EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI.....9

1.1 Introduzione.....9
1.2 Certificazione e classificazione energetica degli edifici.....9
1.3 Prestazioni dell'edificio ed Efficienza energetica.....14
1.4 Componenti della finestra e calcolo delle loro prestazioni.....17

CAPITOLO 2. DESCRIZIONE DEI SOFTWARE UTILIZZATI.....23

2.1 Introduzione.....23
2.2 Energy Plus.....23
2.3 Window5.....46

CAPITOLO 3. MODELLI E PIANO DELLE SIMULAZIONI.....53

3.1 Introduzione.....53
3.2 Descrizione dei modelli di edifici.....54
3.3 Piano delle simulazioni.....73

CAPITOLO 4. ANALISI STATISTICA DEI RISULTATI 79

4.1 Introduzione.....79

4.2 Analisi statistiche descrittive.....79

4.3 Analisi statistiche di regressione.....108

4.4 Conclusione e commento dei risultati.....159

CAPITOLO 5. CONCLUSIONI.....163

BIBLIOGRAFIA.....175

SOMMARIO

Il lavoro svolto in questa tesi è suddiviso in due parti: nella prima parte viene introdotto il contesto nel quale questo lavoro si inserisce, poi vengono descritti i software che hanno permesso l'esecuzione delle simulazioni e viene spiegato il modello che sta alla base delle simulazioni; nella seconda parte vengono spiegati i metodo d'analisi dei dati ottenuti e vengono commentati i risultati delle simulazioni.

Nel primo capitolo viene presentata brevemente la Direttiva Europea "clima-energia, obbiettivo: 20/20/20", poi facendo riferimento al *DM 26 Giugno 2009 "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici"* e al *DL 311 del 29/12/2006 "Disposizioni correttive e integrative al DL 192/05, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia"* vengono presentati i concetti di certificazione e di classificazione energetica degli edifici.
In questo lavoro l'attenzione si è focalizzata maggiormente sulle superfici finestrate perché sono un punto di particolare interesse nel bilancio termico dell'ambiente confinato: se da un lato hai maggiori dispersioni attraverso le finestre rispetto alle pareti opache, dall'altro hai anche l'ingresso di apporti solari nell'ambiente. Quindi è interessante lo studio del trade-off.
Nella seconda parte del capitolo l'attenzione si sposta sull'involucro edilizio e sulle componenti sulle quali si può agire per migliorarne l'efficienza e le prestazioni conseguendo un risparmio energetico, verranno spiegati brevemente i parametri sui quali agire per conseguire il risparmio energetico in edilizia con particolare attenzione ai sistemi finestrati perché sono considerati, dal punto di vista termico, "l'anello debole" dell'involucro edilizio.
Il secondo capitolo è dedicato alla descrizione della struttura del software di simulazione utilizzato *EnergyPlus (versione 4.0)* entrando nel dettaglio dei moduli utilizzati in questo lavoro, viene descritto anche il software *Window5* utilizzato per la creazione e modellazione dei moduli delle superfici vetrate e finestrate installate negli edifici oggetto delle simulazioni e quindi oggetto dell'analisi.

La prima parte del terzo capitolo è dedicata alla definizione del modello di edificio simulato e alla descrizione dei fattori in esame che sono: località (Messina, Roma e Milano), spessore dell'isolante (5 cm, 10 cm, 15 cm), tipologia e forma della pianta di edificio (1:1, 3:4 N/S, 3:4 E/O, 1:2 N/S, 1:2 E/O, 1:4 N/S, 1:4 E/O), orientazione preferenziale delle superfici vetrate (Sud, Est e Ovest), estensione della superficie vetrata (11.66 m^2, 17.49 m^2, 23.32 m^2), tipologia di vetro installata (Doppio o Triplo vetro con coefficiente di scambio termico solare SHGC "alto" o "basso").
Di ogni fattore sono state descritte le caratteristiche termo fisiche significative ai fini dell'analisi svolta.
Nella seconda parte del capitolo è spiegato il piano delle simulazioni adottato perché l'elevata variabilità dei fattori scelti ha prodotto un gran numero di casi simulabili, al massimo 2268, di cui ne sono stati simulati 1729 perché negli altri casi la superficie vetrata prevista era superiore alla superficie della parete studiata.
Viene inoltre spiegata l'organizzazione dei file e le modalità di esecuzione della simulazione al software *EnergyPlus.*
Nel quarto capitolo viene presentata l'analisi statistica dei risultati ottenuti dalle simulazioni.
Sono stati svolti due tipi di analisi: "Analisi Statistica 1" e "Analisi Statistica 2", nella prima, di natura maggiormente qualitativa, le variabili considerate sono i fattori presi in esame per le simulazioni mentre nella seconda analisi si sono considerate altre variabili focalizzate sulle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio (si sono considerate le prestazioni delle superfici opache e delle superfici vetrate).
Nella prima parte del capitolo viene presentata l'analisi statistica descrittiva svolta sui due tipi d'analisi, valutando gli effetti di fattori e delle variabili in esame sui fabbisogni estivi e invernali.
La seconda parte del capitolo tratta la statistica di regressione lineare, vengono presentati brevemente i concetti teorici che stanno alla base della statistica di regressione lineare semplice e multivariata e viene presentato il software *SPSS Statistics 18.0* utilizzato per condurre le analisi di regressione.
Nel paragrafo conclusivo del capitolo sono riassunti i risultati emersi dalle analisi statistiche svolte sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni.

INTRODUZIONE

Il cambiamento climatico, la necessità di ridurre le emissioni di gas serra e la necessità di ridurre i costi energetici sono i principali motori che spingono i paesi industrializzati del mondo, tra cui quelli l'Italia, verso il risparmio energetico.
Nel Dicembre 2008 l'Unione Europea ha adottato una strategia integrata in materia di energia e cambiamenti climatici, che fissa obbiettivi ambiziosi per il 2020.
Lo scopo è di indirizzare gli stati membri della Comunità Europea verso un'economia sostenibile a basse emissioni di CO_2 improntata sull'efficienza energetica.
Sono previste le seguenti misure:

- Ridurre le emissioni dei gas serra del 20%;
- Ridurre i consumi energetici del 20% attraverso l'aumento dell'efficienza energetica;
- Soddisfare il 20% del fabbisogno energetico mediante l'utilizzo di energie rinnovabili.

Nel 2008 l'energia richiesta nel settore edile fetta rappresentava il 41% dell'energia consumata nell'Unione Europea, in Italia per contenere i consumi energetici in questo settore e per conseguire un risparmio energetico sono stati approvati: *la Legge 10/91 "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia"*, il *DM 26 Giugno 2009 "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici"* e il *DL 311 del 29/12/2006 "Disposizioni correttive e integrative al DL 192/05, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia"*.
Per la costruzione di edifici a basso consumo energetico e a basso impatto ambientale, è necessario che già dalla progettazione di tali edifici ci sia un'orientazione al risparmio energetico.
A tale scopo possono essere utilizzati dei software che permettono la simulazione dinamica degli edifici per la valutazione e stima dei carichi energetici invernali ed estivi richiesti.

In questa tesi si vuole valutare l'influenza delle proprietà termo fisiche delle componenti vetrate sulle prestazioni dell'involucro edilizio.

Le dispersioni e la radiazione solare che giunge all'interno dell'edificio attraverso le superfici vetrate, possono far variare in modo considerevole i fabbisogni invernali ed estivi e quindi il bilancio energetico annuale.

In questo lavoro si esegue la simulazione dinamica degli edifici per la valutazione dei fabbisogni energetici in regime invernale ed estivo al variare di fattori d'interesse relativi sia all'involucro trasparente (in particolar modo) che anche all'involucro opaco, al fine di evidenziare eventuali interazioni e studiare il comportamento dell'involucro trasparente in edifici con diversa pianta e orientazione, nonché diverso grado di isolamento termico.

Si vuole così valutare l'impatto che hanno sulle prestazioni dell'edificio la scelta della tipologia di vetro (guadagno solare alto o basso), il sistema di vetro installato (doppio o triplo) e la loro estensione ed orientazione.

CAPITOLO 1.

CERTIFICAZIONE ED EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI

1.1 Introduzione

Con l'approvazione nel Dicembre 2008 del pacchetto "clima-energia, obbiettivo: 20/20/20" l'Unione Europea impone un tetto massimo di emissione di CO_2 a livello comunitario perciò tutti i principali responsabili della produzione delle emissioni di CO_2 saranno incoraggiati a sviluppare tecnologie produttive pulite e tecnologie che permettano la diminuzione della produzione di CO_2.

Le misure previste imporranno ai governi dei paesi membri dell'Unione Europea obbiettivi giuridicamente vincolanti, il pacchetto "clima-energia" intende consentire all'Unione Europea entro il 2020 di ridurre di almeno il 20% le emissioni di gas serra, portare al 20% il risparmio energetico attraverso l'aumento dell'efficienza energetica e soddisfare il 20% del nostro fabbisogno energetico mediante l'utilizzo di energie rinnovabili, rispetto ai valori registrati nel 1990.

Anche l'Italia ha dovuto e deve adeguarsi alla direttiva europea, per prima cosa deve invertire il trend dei consumi primari passando da una crescita moderata del consumo ad una sensibile riduzione.

1.2 Certificazione e classificazione energetica degli edifici

La riduzione delle emissioni di gas serra, il risparmio energetico e l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile includono anche il settore edile che comprende una buona fetta del consumo totale di energie primarie.

Per puntare ad ottenere sostanziali miglioramenti sul risparmio energetico in questo settore è evidente l'importanza di utilizzare materiali e tecnologie costruttive che consentano di diminuire il consumo energetico degli edifici (residenziali e non), allo stesso tempo è fondamentale l'utilizzo di strumenti che

consentano di stimare, già in fase di progetto, i fabbisogni energetici degli edifici.

La certificazione energetica degli edifici è uno strumento previsto dalla direttiva europea, in Italia il 10 Luglio 2009 è stato approvato il *DM 26 Giugno 2009 "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici" .*
Gli attestati di certificazione energetica hanno validità temporale massima di dieci anni che è confermata solo se sono rispettate le prescrizioni normative vigenti per le operazioni di controllo dell'efficienza energetica, inoltre l'attestato di certificazione energetica deve essere aggiornato ad ogni intervento di ristrutturazione dell'edificio (edilizio o impiantistico) che ne modifichi le prestazioni energetiche.
Le prestazioni dell'involucro devono garantire il comfort termico e igrometrico degli spazi confinati e il contenimento dei consumi energetici mediante il soddisfacimento dei seguenti requisiti prestazionali (tecnologici e ambientali).
1. Requisiti Ambientali:

- Mantenimento della temperatura dell'aria negli spazi abitativi nelle stagioni di esercizio degli impianti di riscaldamento entro i limiti di legge di 20 – 22 °C.
- Mantenimento delle condizioni di comfort termico negli ambienti interni nel periodo estivo.

2. Requisiti Tecnologici:

- Controllo dei fenomeni di condensa superficiale e interstiziale
- Controllo della combinazione "Temperatura – Umidità – Ventilazione"
- Resistenza termica e inerzia termica ai fini del risparmio energetico e del comfort ambientale interno.

L'involucro edilizio deve essere in grado di ottimizzare le interazioni tra ambiente interno e ambiente esterno (e viceversa) al variare delle diverse condizioni climatico -ambientali nel corso della giornata, nel corso dell'anno e nel corso della "vita" dell'edificio stesso.
Dal concetto di involucro come elemento energeticamente passivo, di separazione tra ambiente interno e esterno, si passa al concetto di involucro

come elemento dinamico e interattivo del complesso sistema energetico che regola il funzionamento dell'edificio.

Le prestazioni energetiche dell'edificio, quindi la classificazione energetica dell'edificio stesso, consentono pertanto di attribuire una "valutazione" alle abitazioni attraverso l'attribuzione di una classe.
Secondo il protocollo *Ecodomus* la più virtuosa energeticamente, e quindi economicamente, *è la classe A+*, mentre la più dispendiosa, come mostrato in Figura 1.1, è la classe G:

Figura 1.1

La scelta di adottare per la classificazione energetica una tabella policromatica, dal verde (basso fabbisogno energetico) al rosso (alto fabbisogno energetico) abbinata alle lettere dell'alfabeto come già in uso per gli elettrodomestici, serve per consentire a tutti di capire se un edificio consuma molta o poca energia.

Di seguito vengono elencati i consumi medi indicativi per ciascuna classe di edificio:
Classe energetica A+ : < 15 KWh/ m^2 anno
Classe energetica A: tra 15- 30 KWh/mq annuo = < 3 litri gasolio/ m^2 anno
Classe energetica B: tra 31-47 KWh/mq annuo = 3,1-5 litri gasolio/ m^2 anno
Classe energetica B+: tra 47-63 KWh/mq annuo = 3,1-5 litri gasolio/ m^2 anno
Classe energetica C: tra 63-108 KWh/mq annuo = 5,1-7 litri gasolio/ m^2 anno
Classe energetica D:tra 108-154 KWh/mq annuo = 7,1- 9 litri gasolio/ m^2anno

Classe energetica E: tra 154-192 KWh/mq annuo=9,1-12 litri gasolio/ m^2 anno

Classe energetica F: tra 192-231 KWh/mq annuo=12,1-16 litri gasolio/m^2 anno

Classe energetica G: > 231 KWh/mq annuo => 16 litri gasolio/ m^2 anno

La certificazione energetica degli edifici prevede prima una sezione per la classe di isolamento termico e poi una per la qualità dell'impiantistica ad alta efficienza energetica.

Per quanto riguarda l'isolamento termico si punta a ridurre al minimo il fabbisogno termico dell'edificio, per l'impiantistica si punta ad installare impianti in linea con gli obiettivi di risparmio energetico, di tutela del clima e di protezione dell'ambiente. Tale ordine di priorità è dettato dal fatto che la vita di una casa è due o tre volte più lunga di quella degli impianti.

Precedentemente al *DM 26 Giugno 2009* , nel Febbraio 2007, era entrato in vigore il *DL 311 del 29/12/2006 "Disposizioni correttive e integrative al DL 192/05, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia".*

Questo provvedimento richiede ulteriori sforzi a progettisti e costruttori per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici e completa il precedente aggiungendo importanti elementi:

- Requisiti ancora più restrittivi per gli edifici
- Scaletta di applicazione del sistema di certificazione energetica
- Campo di applicabilità più chiaro
- Sanzioni per chi non rispetta quanto indicato.

Il DL 311/06 attribuisce dei limiti per zona climatica (individuata dai gradi giorno-GG) e per tipologia di edificio.

La classificazione climatica dei comuni è stata introdotta dal D.P.R. n. 412 del 26 agosto 1993, nel quale è fornito il valore dei gradi giorno dei comuni italiani; i gradi giorno (GG) indicano fabbisogno termico di un'area geografica relativa alle normative vigenti sul riscaldamento - raffrescamento delle abitazioni.

Il valore numerico rappresenta la somma delle differenze giornaliere (solo positive o solo negative) tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20 °C, e la temperatura media giornaliera esterna.
La somma delle differenze giornaliere, tra le due temperature, viene eseguita per tutti i giorni del periodo annuale convenzionale.
Un valore basso indica un breve periodo di riscaldamento/raffreddamento e temperature medie giornaliere prossime alla temperatura fissata per l'ambiente.
Al contrario, valori elevati, indicano periodi di riscaldamento/raffreddamento prolungati e temperature medie giornaliere nettamente inferiori/superiori rispetto alla temperatura di riferimento.

In funzione dei gradi giorno (GG) sono state definite sei fasce climatiche (Figura 1.2) nel territorio italiano e i limiti massimi relativi al periodo annuale di esercizio dell'impianto termico ed alla durata giornaliera di attivazione:

- **fascia A:** < 600 GG; ore 6 giornaliere dal 1º dicembre al 15 marzo; 2 comuni;
- **fascia B:** tra 601 e 900 GG; ore 8 giornaliere dal 1º dicembre al 31 marzo; 157 comuni;
- **fascia C:** tra 901 e 1400 GG; ore 10 giornaliere dal 15 novembre al 31 marzo; 989 comuni;
- **fascia D:** tra 1401 e 2100 GG; ore 12 giornaliere dal 1º novembre al 15 aprile; 1611 comuni;
- **fascia E:** tra 2101 e 3000 GG; ore 14 giornaliere dal 15 ottobre al 15 aprile; 4271 comuni;
- **fascia F:** > 3000 GG; nessuna limitazione (tra le ore 5 e le ore 23 di ciascun giorno); 1071 comuni.

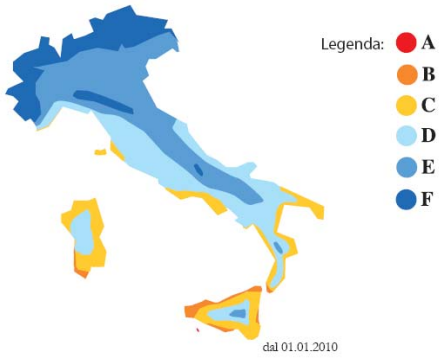


Figura 1.2 – Zone climatiche

1.3 Prestazioni dell'edificio ed Efficienza energetica

Le prestazioni energetiche dell'edificio, dei singoli materiali e componenti che lo costituiscono vengono misurate attraverso vari parametri, tra i quali:

- *Conduttività termica (λ):* si esprime in *W/mK* ed è la proprietà fisica di un materiale di trasmettere il calore, maggiore è la conduttività termica più consistente è il passaggio di calore attraverso il materiale in oggetto. Comunemente i materiali isolanti sono caratterizzati da una conduttività termica compresa tra 0.035-0.045 *W/mK*, minore è il valore e maggiore sarà l'isolamento.
- *Trasmittanza termica (U):* questo parametro descrive quanto calore fluisce attraverso un elemento costruttivo, si esprime in W/m^2K e più piccolo è il valore della trasmittanza migliore è l'effetto isolante dell'elemento costruttivo in esame. Dipende sia dalla conduttività termica, in modo lineare, che dallo spessore dell'elemento preso in considerazione: si ottengono bassi valori di trasmittanza utilizzando materiali con bassa conduttività termica e di spessore generoso.
- *Fabbisogno termico per il riscaldamento*:è la quantità di calore che deve essere prodotta dall'impianto di riscaldamento in un anno per mantenere gli ambienti interni riscaldati ad una temperatura prefissata. Questa grandezza è espressa in *kWh/anno* ed è composta dal fabbisogno termico dovuto alle perdite di calore per trasmissione (quantità di calore dispersa attraverso le pareti perimetrali, tetto, finestre,…) e dal fabbisogno termico dovuto alle perdite per ventilazione, dal bilancio devono essere sottratti

gli apporti energetici interni (calore emesso dalle persone o apparecchi elettrici interni) e il guadagno solare (irraggiamento solare attraverso le superfici finestrate). Minore è il fabbisogno termico per il riscaldamento e minori saranno i costi e maggiore il comfort abitativo interno.

Prendendo in considerazione una casa "standard" si possono stimare le seguenti perdite di calore percentuali, schematizzate in Figura 1.3:

- Pareti esterne 20-25%
- Finestre 20-25%
- Aerazione 20-25%
- Tetto o solaio ultimo piano 15-20%
- Cantina 5-6%
- Perdite della caldaia 10-12%

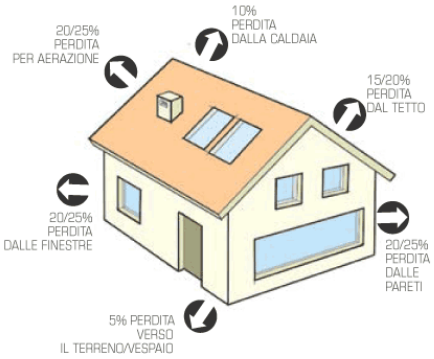

10% PERDITA DALLA CALDAIA
20/25% PERDITA PER AERAZIONE
15/20% PERDITA DAL TETTO
20/25% PERDITA DALLE FINESTRE
20/25% PERDITA DALLE PARETI
5% PERDITA VERSO IL TERRENO/VESPAIO

Figura 1.3

Un elevato rendimento energetico si ottiene minimizzando le perdite e sfruttando al massimo i guadagni solari passivi ed i contributi interni di calore.
Per raggiungere tale obbiettivo sono fondamentali quattro fattori:

- Isolamento termico
- Tenuta all'aria
- Orientamento dell'edificio
- Finestratura adeguata

Generalmente in un edificio tradizionale l'elemento costruttivo più "debole" che isola termicamente peggio e causa più perdite di calore è rappresentato dalle finestre, come si può vedere dalla termografia riportata in Figura 1.4: un edificio con serramenti di scarsa qualità ha le maggiori perdite di calore proprio attraverso le finestre (zone rosse):

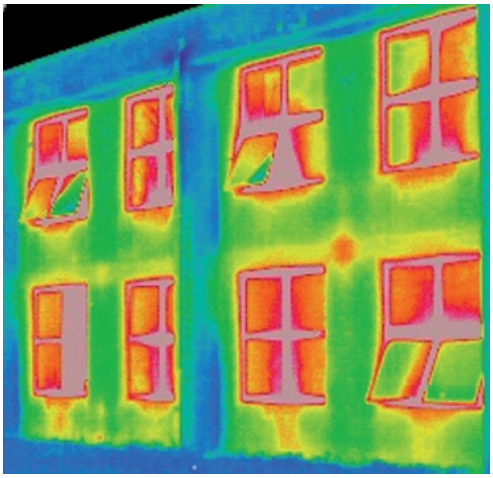


Figura 1.4

La trasmittanza delle superfici vetrate è espressa dal valore U_g.
E' quindi indispensabile utilizzare finestre termoisolanti con opportuni vetri installati, le finestre devono lasciare entrare molta luce e far uscire la minor quantità possibile di calore.
La scelta dei vetri deve essere fatta considerando l'orientazione e gli ombreggiamenti, per meglio sfruttare l'energia solare si deve ricercare il miglior orientamento possibile per la zona in cui sorge l'edificio e fare attenzione che gli ombreggiamenti consentano di sfruttare al meglio l'irraggiamento solare nel periodo invernale e allo stesso tempo proteggere l'edificio nel periodo estivo.

Durante l'inverno l'energia che proviene dall'irraggiamento solare è la benvenuta, ma durante i mesi estivi può causare un surriscaldamento all'interno dell'edificio.

Bisogna pertanto trovare un compromesso tra l'apporto d'energia in inverno e la necessità di proteggersi dal calore in estate, però senza dover rinunciare all'illuminazione naturale dei locali.

1.4 Componenti della finestra e calcolo delle loro prestazioni

1.4.1 Caratteristiche geometriche e calcolo delle prestazioni

In Figura 1.5 è schematizzata una finestra a 2 ante con le relative quote indicanti le dimensioni principali:

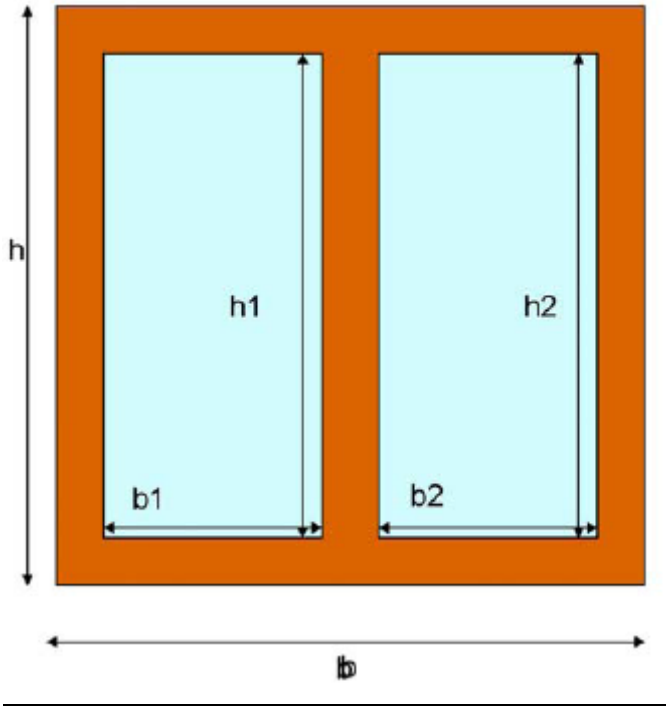


Figura 1.5

Area della vetrata (Ag): l'area della vetrata di una finestra o di una porta è la più piccola parte delle aree visibili, viste da entrambe i lati, si ottiene moltiplicando la base per l'altezza della superficie vetrata visibile.

Area del telaio (Af): l'area del telaio è la maggiore delle aree proiettate del telaio (interna o esterna), l'area proiettata del telaio è la proiezione su un piano parallelo al vetro dell'area del telaio interno o esterno (*Afi o Afe*).

Area della finestra (Aw): l'area totale della finestra è data dalla somma *dell'Area della vetrata (Ag) e dell'Area del telaio (Af).*

Schematizzazione di una finestra singola

Legenda

1 Telaio fisso

2 Telaio mobile

3 Vetrata (singola o multipla)

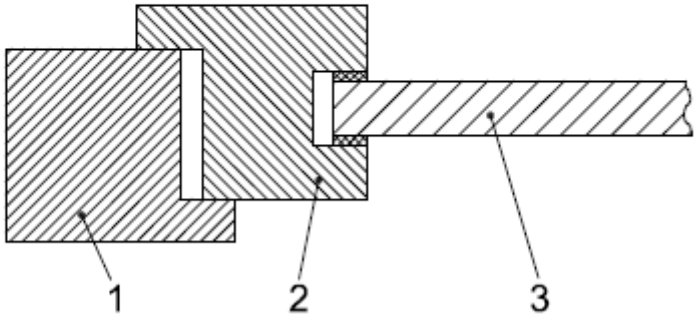


Figura 1.6 – Schematizzazione di una finestra singola

Per finestre e porte-finestre, la trasmittanza termica del serramento rappresenta la media pesata tra la trasmittanza termica del telaio Uf e di quella della vetrata Ug, più un contributo aggiuntivo, la trasmittanza termica lineare Ψg, dovuto all'interazione fra i due componenti e alla presenza del distanziatore, applicato lungo il perimetro visibile della vetrata.

Secondo la norma UNI EN ISO 10077-1 la trasmittanza termica di una finestra singola (in Figura 1.6) si calcola attraverso la seguente equazione:

$$U_W = \frac{A_g U_g + A_f U_f + l_g \Psi_g}{A_g + A_f}$$

Dove:

- Ug è la trasmittanza termica della vetrata;
- Uf è la trasmittanza termica del telaio;
- Ψg è la trasmittanza termica lineare dovuta agli effetti termici combinati tra telaio, distanziale tra vetrata e telaio e la vetrata.

Sempre secondo la norma UNI EN ISO 10077-1 la trasmittanza termica della vetrata, in caso di vetrate multiple, può essere calcolata con l'equazione:

$$U_g = \frac{1}{R_{se} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum_j R_{s,j} + R_{si}}$$

Dove:

- Rse, Rsi e Rsj sono la resistenza termica della superficie esterna, interna e della j-esima intercapedine;
- λj è la conduttività termica della j-esima lastra o intercapedine;
- di è lo spessore della j-esima lastra o intercapedine.

1.4.2 Prestazioni delle componenti del serramento indicate dalle normative di riferimento

Per i telai:

- Telai metallici interi/non isolati: Uf =7,0 W/m^{2}K [fonte: UNI EN ISO 10077-1/Appendice F]
- Telai in legno/PVC: Uf =2,0 W/m^{2}K [fonte: UNI EN ISO 10077-1/Appendice F]
- Telai alluminio a taglio termico: Uf compreso tra 2,2 e 3,8 W/m^{2}K [fonte: UNI EN ISO 10077-1/Appendice F]

Per le vetrate,

- Vetro singolo: Ug =5,8 W/m^{2}K [fonte: Manuale Tecnico Saint Gobain Vetro Italia]
- Vetrocamera 4-12-4: 2,8 W/m^{2}K [fonte: UNI EN ISO 10077-1/Appendice F]

Nel *DL 311/06* vengono definiti per ogni zona climatica descritta nel *Paragrafo 1.2* i valori limite di trasmittanza termica attraverso:

- strutture opache verticali e orizzontali (pavimento e copertura);
- chiusure trasparenti e vetri.

I valori limite di trasmittanza termica che devono rispettare le chiusure trasparenti comprensive degli infissi sono riportate in Tabella 1.7 che riporta i valori contenuti nella *Tabella 4a dell'allegato C del DL 311/06*:

TABELLA 4.a	**Chiusure trasparenti** Valori limite della trasmittanza termica U espressa in W/m^2K		
Zona climatica	**Dall' 1 gennaio 2006** U (W/m^2K)	**Dall' 1 gennaio 2008** U (W/m^2K)	**Dall' 1 gennaio 2010** U (W/m^2K)
A	5.5	5.0	4.6
B	4.0	3.6	3.0
C	3.3	3.0	2.6
D	3.1	2.8	2.4
E	2.8	2.4	2.2
F	2.4	2.2	2.0

Tabella 1.7

I valori limite di trasmittanza termica che devono rispettare le chiusure trasparenti, considerando le sole prestazioni dei vetri sono contenuti in Tabella 1.8 che riporta i valori presenti nella *Tabella 4b dell'Allegato C del DL 311/06*:

TABELLA 4.b	**Vetri** Valori limite della trasmittanza termica U espressa in W/m^2K		
Zona climatica	**Dall' 1 gennaio 2006** U (W/m^2K)	**Dall' 1 luglio 2008** U (W/m^2K)	**Dall' 1 gennaio 2011** U (W/m^2K)
A	5.0	4.5	3.7
B	4.0	3.4	2.7
C	3.0	2.3	2.1
D	2.6	2.1	1.9
E	2.4	1.9	1.7
F	2.3	1.7	1.3

Tabella 1.8

I valori limite della trasmittanza termica utile *U* delle strutture componenti l'involucro edilizio, espressi in W/m^2K, sono riportati in Tabella 1.9 che ripropone la *Tabella 2 in sostituzione al comma 2 dell'allegato B*:

Tabella 2. Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture componenti l'involucro edilizio espressa in (W/m^2K)

Zona Climatica	Strutture opache verticali	Strutture opache orizzontali o inclinate		Chiusure apribili e assimilabili (**)
		Coperture	Pavimenti (*)	
A	0.54	0.32	0.60	3.70
B	0.41	0.32	0.46	2.40
C	0.34	0.32	0.40	2.10
D	0.29	0.26	0.34	2.00
E	0.27	0.24	0.30	1.80
F	0.26	0.23	0.28	1.60

(*) Pavimenti verso locali non riscaldati o verso l'esterno

(**) Conformemente a quanto previsto all'articolo 4, comma 4, lettera c), del Dpr 2 aprile 2009, n. 59, che fissa il valore massimo della trasmittanza (U) delle chiusure apribili e assimilabili, quali porte, finestre e vetrine anche se non apribili, comprensive degli infissi

Tabella 1.9

CAPITOLO 2.

DESCRIZIONE DEI SOFTWARE UTILIZZATI

2.1 Introduzione

Nel primo capitolo vengono presentati il software utilizzato per la simulazione dinamica dell'involucro edilizio e il software che ha permesso di definire le specifiche tecniche e geometriche dei serramenti applicati all'involucro stesso.
Nel caso studio in questione è stato utilizzato, per la simulazione dinamica dell'edificio, il software *EnergyPlus (versione 4.0).*
La progettazione dei serramenti e la definizione delle tipologie di vetro analizzate è stata possibile grazie all' utilizzato del software ausiliario *Window5.*
La seguente descrizione dei software utilizzati, per la simulazione e per la definizione delle tipologie di vetro utilizzate, è focalizzata sulla loro struttura e sui moduli impiegati.

2.2 EnergyPlus

2.2.1 Descrizione Programma

EnergyPlus è un software basato sui programmi BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e DOE-2, sviluppati negli Anni 80 per poter eseguire stime e simulazioni sui carichi energetici degli edifici.
La natura open source del software, realizzato dal DoE (*Dipartimento Energetico degli Stati Uniti*) , ha permesso di superare di gran lunga le capacità degli altri programmi di riferimento e l'ha reso uno dei più affidabili strumenti di simulazione presenti nel settore. Un'alternativa affidabile a EnergyPlus è TRNSYS, che però è un software a pagamento.

EnergyPlus consente, attraverso la simulazione dinamica, la stima dei carichi energetici di una determinata struttura edilizia (residenziale, commerciale o industriale) e permette di condurre un'analisi integrata del rendimento energetico dell'edificio in esame e degli impianti che ne fanno parte.

Proprio per l'elevato grado d'analisi che il software consente in fase di progetto, i destinatari principali di tale software sono Ingegneri e Architetti che attraverso questo strumento di lavoro hanno potuto e possono ottimizzare le prestazioni energetiche dell'edificio o dei singoli impianti che lo compongono.

Gli elementi che caratterizzano il software EnergyPlus sono:

- la possibilità di considerare una soluzione integrata e simultanea del sistema edificio (involucro esterno) e dell'impianto
- utilizzo di intervalli di simulazione inferiori all'ora
- input e output sono presentati come file di testo
- soluzioni basate sul bilancio termico ottenute sfruttando il calcolo in regime transitorio e le funzioni di trasferimento del calore
- possibilità di studio del benessere termo-igrometrico degli occupanti dell'edificio, calcolo e verifica igrometrica tramite il modello EMPD (Effective Moisture Penetration Depth Model)
- calcoli avanzati sulla radiazione entrante dalle finestre (possibilità di analisi strato per strato, variazione degli ombreggiamenti…)
- utilizzo di un modello di radiazione anisotropico (modello Perez del 1990)
- stima, calcolo e controllo delle emissioni inquinanti
- possibilità di collegamento e iterazione con altri software (nel nostro caso *Window5*)
- controlli sull'illuminazione interna

Il punto di partenza, per l'analisi, è la struttura edilizia della quale devono essere fornite le caratteristiche strutturali,costruttive e impiantistiche.
La simulazione dinamica al software permette di calcolare i fabbisogni energetici della struttura in termini di:

- Carichi termici di riscaldamento e raffrescamento necessari per mantenere le temperature limite impostate
- Carichi termici per la produzione di acqua calda
- Carichi energetici per la ventilazione
- Carichi energetici per l'illuminazione

In Figura 2.1 è possibile osservare che Energy Plus è architettato secondo una struttura modulare che permette interazioni con interfacce di altri programmi e con l'interfaccia utente, per quanto riguarda la descrizione dell'edificio e la visualizzazione dei risultati.

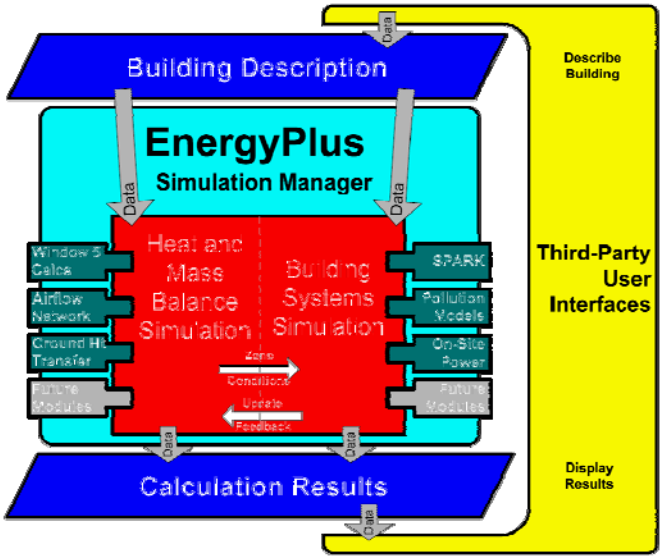


Figura 2.1 – Energy Plus: interazione con altri software (Getting Started with EnergyPlus, p.4)

La struttura modulare, in Figura 2.2, permette di inserire più facilmente nuovi moduli, inoltre essendo un software open source può essere arricchito con moduli creati da terzi, sviluppando un software sempre più completo.

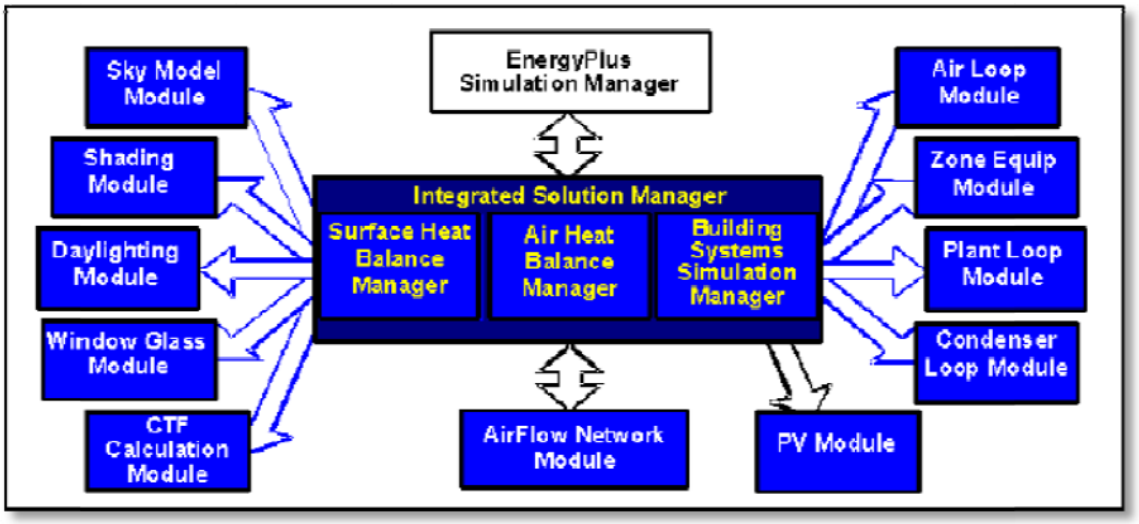


Figura 2.2 – Energy Plus: struttura interna (Getting Started with EnergyPlus, p.5)

I vari moduli sono coordinati e richiamati, durante la simulazione di un edificio, da una subroutine principale definita Manage Simulation che controlla I seguenti percorsi di simulazione: ambiente, ora, giorno, timestep sub orario.

EnergyPlus non è un programma con interfaccia "user friendly", infatti legge come input e fornisce come output unicamente file di testo, è più che altro un "simultation engine".
Per questo motivo il DoE (*Dipartimento Energetico degli Stati Uniti*) l'ha provvisto di programmi ausiliari quali: EP Launch e IDF Editor, il primo permette di "lanciare" le simulazioni mentre il secondo viene utilizzato per progettare i file IDF (contenenti la descrizione dell'edificio, impianti,…).

2.2.2 EP Launch

L'EP Launch è un programma ausiliario sviluppato per EnergyPlus che permette di lanciare simulazioni singole o multiple, l'interfaccia con cui si presenta (Figura 1.3) è semplice e soprattutto intuitiva.

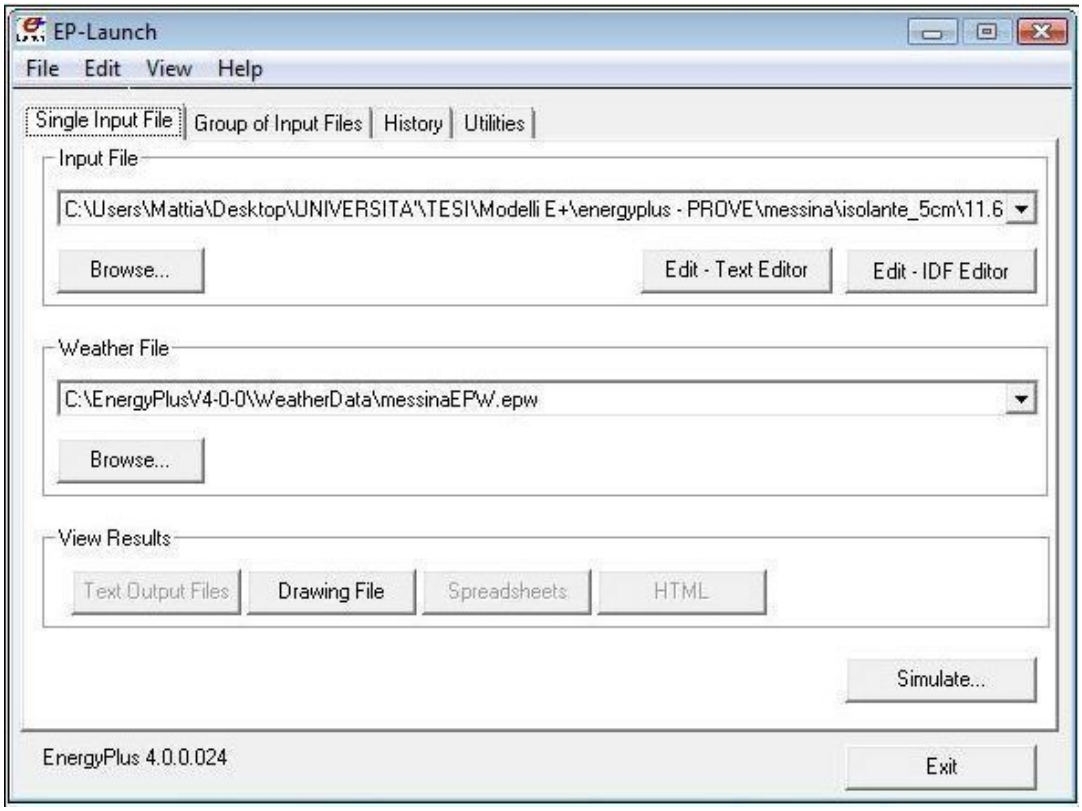


Figura 2.3 – Interfaccia EP Launch

Gli input richiesti dall'EP Launch per la simulazione sono due:

- "Input File" identifica il file IDF, "nomefile.idf", che contiene le informazioni sulla struttura, materiale costruttivo e impianti dell'edificio studiato
- "Weather File" identifica il file climatico "nomefile.EPW" con i dati climatici orari dell'anno standard per la località d'interesse

Nell'interfaccia grafica dell' EP Launch, Figura 2.3, oltre agli input visualizzati nella schermata principale "Single Input File", possiamo notare altre schermate che permettono diverse operazioni quali: lanciare simulazioni multiple in "Group of input Files", tener conto della cronologia delle simulazioni in " History" e accesso a altri software ausiliari in "Utilities" (vedi Tabella 2.4)

Basement	Programma che permette di calcolare la temperatura superficiale delle pareti contro terra attraverso il trasferimento termico 3D
CalcSoilSurfTemp	Programma per il calcolo dei parametri di simulazione delle tubazioni interrate
CoeffCheck	Programma che stampa una mappa di prestazione, data la curva di rendimento bi-quadratico
CoeffConv	Programma che converte le curve di rendimento da gradi Fahrenheit a gradi Centigradi
Slab	Programma che permette di calcolare la temperatura superficiale dei pavimenti contro terra attraverso il trasferimento termico 3D
Weather	Programma che permette di convertire il file climatico "nomefile.EPW" in altri formati
AppGPostProcess	Programma che esegue simulazioni secondo quanto indicato nell'Appendice G dello standard ASHARE 90,1
IDFConverter	Programma che permette di convertire file .IDF di versioni precedenti di Energy Plus in file .IDF compatibili con la versione utilizzata

Tabella 2.4 – Programmi Ausiliari

Gli output forniti da Energy Plus, al termine della simulazione, sono elencati in Tabella 2.5:

Output Files	Descrizione
CSV	File che contiene le informazioni di tutti i parametri selezionati nell'IDF
Audit	Contiene errori e avvisi dei file in input
BND	Contiene dettagli sui nodi del sistema HVAC (Heating Ventilation and Air Conditioning) e sulle connessioni dei componenti
DBG	File di Debug
Delight	Programma che fornisce vari files che consentono il calcolo dell'illuminazione
DXF	Permette di visualizzare un disegno dell'edificio oggetto della simulazione (compatibile con Autocad)
EDD	Fornisce dettagli sul sistema di gestione energetica
EIO	Contiene ulteriori risultati forniti da EnergyPlus
EPMDET	Contiene errori e avvisi di una simulazione multipla
EPMIDF	Permette di "pulire" i file IDF dopo una simulazione multipla
ERR	File che contiene errori e avvisi riscontrati nella simulazione
ESO	Fornisce un rapporto "grezzo" dei valori delle variabili per ogni timestep
EXPIDF	Formato espanso del file IDF
MDD	Fornisce un elenco delle variabili Meter (contatori) a seguito della simulazione
Meter	File delle variabili contatore, in formato **.csv*
MTD	Elenco delle componenti delle variabili contatore
MTR	Rapporto "grezzo" dei valori delle variabili contatore per ogni timestep
ProcCSV	Statistiche generate da CSVProc
RDD	Elenca le variabili in output disponibili dopo una simulazione
SHD	Fornisce informazioni relative agli ombreggiamenti
SSZ	Fornisce dettagli e informazioni sul dimensionamento del sistema
SVG	Fornisce un diagramma blocchi che raffigura l'impianto
Table	Riassunto in formato HTML di tutti i dati ottenuti dalla simulazione
VRML	Virtual Reality Markup Language che descrive l'edificio
ZSZ	Fornisce dettagli e informazioni sul dimensionamento della zona

Tabella 2.5 – Output EP Luanch

Attraverso l' EP Launch si può accedere al secondo programma ausiliario, Edit IDF Editor e Edit-Text Editor, che permette di creare e modificare i file **.idf*.

2.2.3 IDF Editor

I file IDF possono essere creati e modificati con un editor di testo, ma questa operazione oltre ad essere lunga è anche difficoltosa perché necessita l'utilizzo di un linguaggio di programmazione.

Per rendere più semplice l'inserimento, o la modifica, dei dati che descrivono l'edificio dal punto di vista costruttivo e impiantistico EnergyPlus prevede l'utilizzo di un'applicazione chiamata IDF Editor (Figura 2.6).

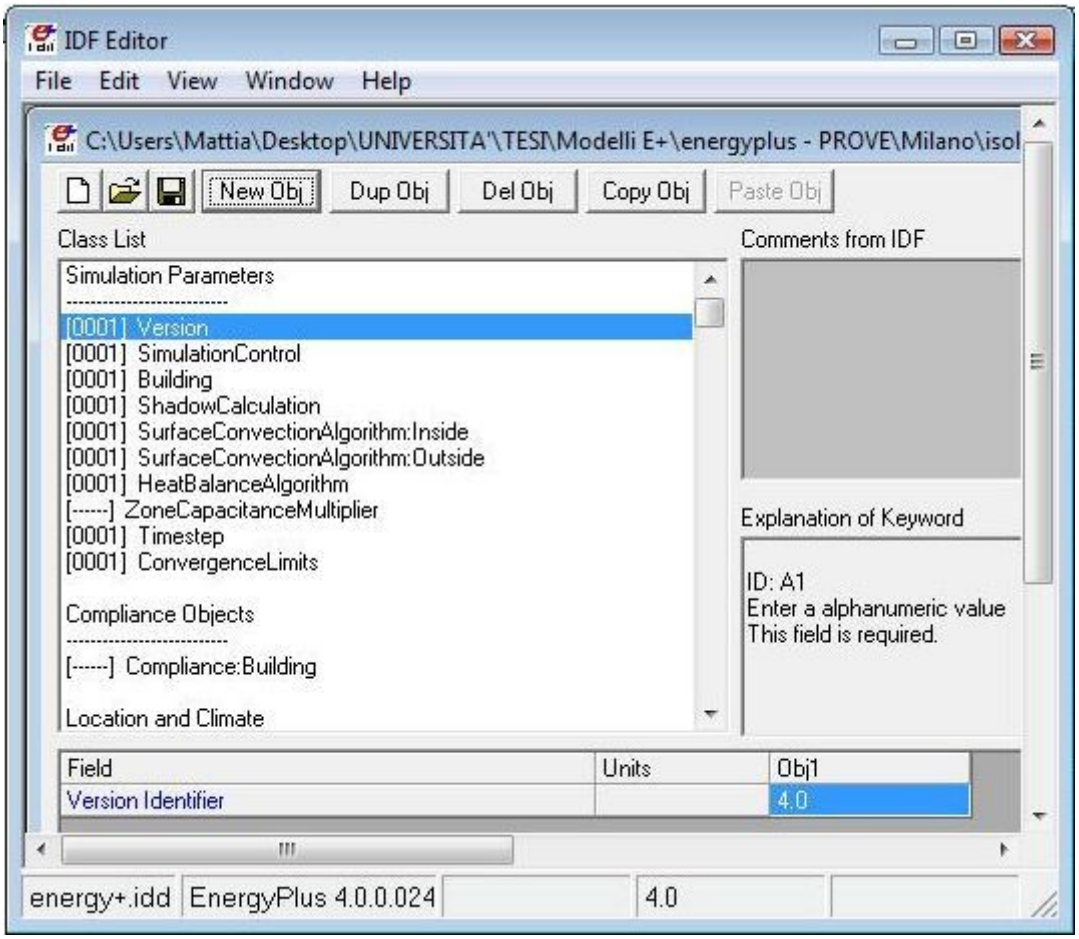


Figura 2.6 – Finestra IDF Editor

Ciò che si nota subito nella schermata iniziale è la "Class List" composta da una serie di "Object", divisi in raggruppamenti, ciascuno dei quali permette di definire le caratteristiche del modello della simulazione.

Nei prossimi paragrafi verranno descritti i vari gruppi, con maggiore attenzione nella descrizione dei gruppi che sono stati utilizzati nel lavoro svolto in questa tesi.

2.2.3.1 Primo Gruppo: "Simulation Parameters"

Gruppo di oggetti che definisce le caratteristiche principali della simulazione

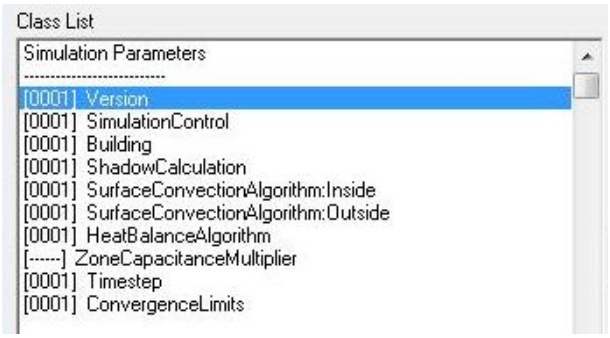


Figura 2.7 – IDF Editor, Class list, Simulation Parameters

Version: versione di EnergyPlus utilizzata (versione 4.0).

Simulation Control: oggetto che stabilisce cosa deve fare la simulazione, che attività devono essere svolte (vedi Tabella 2.8).

Attività	**Descrizione**
Do zone Sizing Calculation	Dimensionamento delle zone
Do System Sizing Calculation	Dimensionamento del sistema
Do Plant Sizing Calculation	Dimensionamento dell'impianto
Run Simulation for Sizing Periods	Simulazione solo per il dimensionamento
Run Simulation for Weather File Run Periods	Simulazione per tutto il periodo definito nel file climatico

Tabella 2.8 – Simulation Control (Attività)

Building: oggetto nel quale è possibile inserire i parametri riguardanti l'edificio (descritti brevemente in Tabella 2.9).

Parametri	**Descrizione**
Name	Nome dell'edificio.
North Axis	Permette di definire l'angolo presente tra l'asse Nord reale e l'asse Nord dell'edificio; consente l'inserimento semplificato dei dati nella descrizione geometrica dell'edificio.
Terrain	Definisce il contesto ambientale in cui è situato l'edificio (City, Suburbs, Country, Ocean e Urban).

Loads Convergence Tolerance Value	Valore di tolleranza sulla convergenza dei carichi (per tale parametro il valore di default pari a 4%).
Temperature Convergence Tolerance value	Valore di tolleranza sulla temperatura, è stato impostato un valore di default pari a 0.4 °C.
Solar Distribution	Questo parametro definisce le modalità attraverso le quali viene distribuita la radiazione solare all'interno delle zone.
Maximum Number of Warmup Days	Numero d'iterazioni nel caso di una mancata convergenza.

Tabella 2.9 – Building (parametri)

Shadow Calculation: oggetto che permette di definire l'intervallo di tempo, espresso in giorni, che intercorre tra un calcolo e l'altro degli ombreggiamenti (all'interno della simulazione); nel nostro caso abbiamo mantenuto i valori di default perché non sono previsti ombreggiamenti di alcun tipo.

Surface Convection Algorithm (Inside & Outside): oggetti che permettono di impostare algoritmi per calcolare gli scambi convettivi.

HeatBalanceAlgorithm: metodo utilizzato per il calcolo della trasmissione del calore attraverso gli elementi opachi dell'involucro edilizio, nel nostro caso è stato utilizzato l'algoritmo *ConductionTransferFunction*.

Timestep: oggetto che permette di definire il "Timestep" della simulazione ovvero il numero di "step" d'analisi che il software effettua in un'ora di simulazione, nelle simulazioni sono stati considerati 6 timestep in un'ora.

2.2.3.2 Secondo gruppo: "Location and Climate"

Gruppo di oggetti che consentono di definire le condizioni climatiche e ambientali delle località d'interesse per la simulazione (Figura 2.10).

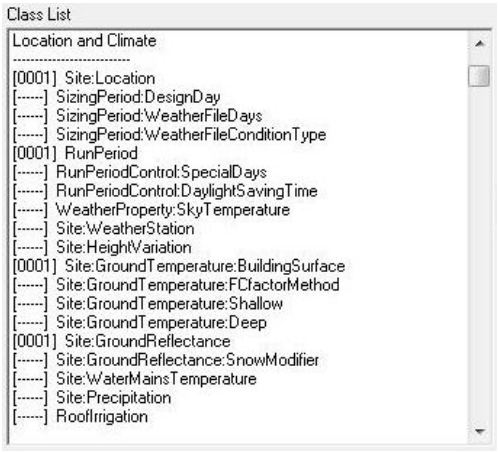


Figura 2.10 – IDF Editor, Class list, Location and Climate

Site Location: nell'oggetto in questione si inseriscono tutte le informazioni riguardanti la località in cui sorge l'edificio (Tabella 2.11)

Parametri	**Descrizione**
Name	Nome della città
Latitude	Latitudine
Longitude	Longitudine
Time Zone	Fuso orario rispetto Greenwich
Elevation	Altitudine

Tabella 2.11 – Site Location (parametri)

Run Period: tipologia di object che permette di definire le caratteristiche del periodo di simulazione (Tabella 2.12), applicabile anche a simulazioni multiple.

Parametri	**Descrizione**
Name	Nome dell'object
Begin Month	Mese d'inizio simulazione
Begin Day of Month	Giorno d'inizio simulazione
End Month	Mese di fine simulazione
End Day of Month	Giorno di fine simulazione
Day of Week for Start Day	Giorno della settimana d'inizio simulazione
Use Weather File Holidays and Special Days	Informazioni riguardanti le vacanze, presenti nel file climatico (perché i giorni festivi si possono caratterizzare per profili di carico differenti rispetto ai feriali)

Use Weather File Daylight Saving Period	Uso delle informazioni sull'ora legale riportate nel file climatico
Apply Weekend Holiday Rule	Traslazione dei giorni festivi se essi coincidono con i fine settimana
Use Weather File Rain Indicators	Uso degli indicatori di pioggia nel file climatico
Use Weather File Snow Indicators	Uso degli indicatori di neve nel file climatico
Number of Times Runperiod to be Repeated	Numero di volte in cui sarà ripetuto il periodo di simulazione.

Tabella 2.12 – Run Period (parametri)

Site:Ground Temperature: Building Surface : object nel quale si devono inserire le temperature medie mensili del terreno (vengono utilizzate dai modelli di trasferimento del calore dal terreno): 18 °C nei mesi Gennaio, Febbraio, Marzo, Aprile, Maggio, Settembre, Ottobre, Novembre e Dicembre, 24 °C nei mesi estivi Giugno, Luglio, Agosto.

Site: Ground Reflectance: in questo object devono essere impostati i valori di albedo del suolo, è stato scelto il valore 0,2 per tutti 12 i mesi.

2.2.3.3 Terzo gruppo: "Schedules"

Questo gruppo permette di impostare delle grandezze variabili nel tempo (ad es. illuminazione, numero di persone all'interno dell'edificio…)

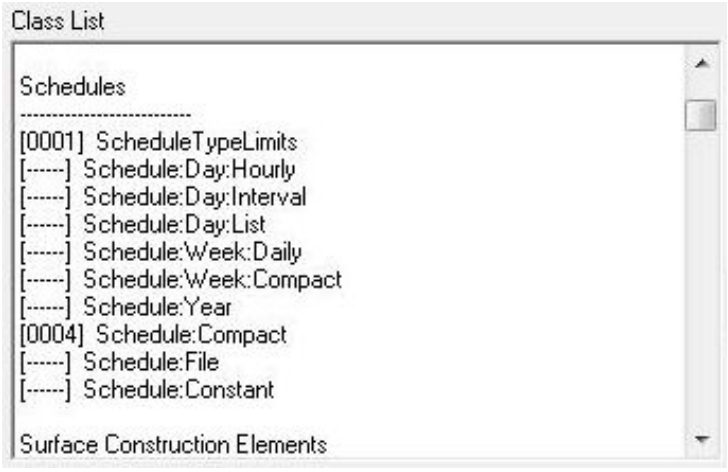


Figura 2.13 – IDF Editor, Class list, Schedules

Schedule Type Limits: oggetto che consente di definire e validare limiti e altre caratteristiche delle altre "schedules" (valori limite superiore e inferiore, nome dei limiti, utilizzo di valori continui o discreti).

Schedule: Compact: permette di definire le varie tipologie di schedules e non presenta dei valori limite di default, ciò rende l'object più flessibile rispetto agli altri.

2.2.3.4 Quarto Gruppo :"Surface Construction Elements"

Questo gruppo di objects consente di definire caratteristiche fisiche e costruttive dei componenti dell'edificio oggetto delle simulazioni come: pareti, pavimento, soffitto, finestre… (come elencato in Figura 2.14)

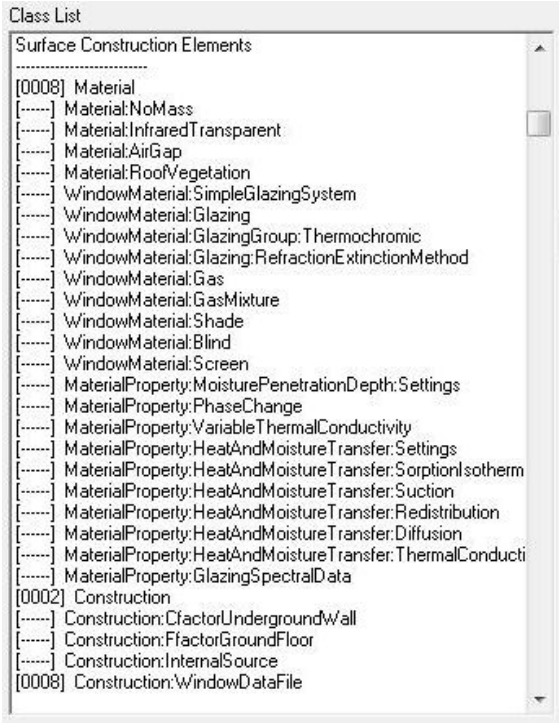


Figura 2.14 – IDF Editor, Class list, Surface Construction Elements

Material: si possono definire gli strati, "layers", di materiale diverso che poi verranno utilizzati per definire la struttura delle pareti orizzontali verticali (le caratteristiche fisiche dei layers considerati verranno elencate nel cap. 3 relativo alle simulazioni svolte).

In Tabella 2.15 vengono elencate le caratteristiche considerate nella simulazione:

Parametri	**Descrizione**
Name	Nome del layer
Roughness	Rugosità superficiale (serve a determinare lo scambio convettivo se lo strato è superficiale) ci siamo affidati ad un *MediumRough*
Thickness	Spessore dello strato [m]
Conductivity	Conducibilità [W/m·K]
Density	Densità [kg/m^3]
Specific Heat	Calore specifico [J/kg·K]
Thermal Absorptance	Frazione di radiazione ad onda lunga assorbita dallo strato.
Solar Absorptance	Frazione di radiazione solare assorbita dallo strato.
Visible Absorptance	Frazione di radiazione visibile assorbita dallo strato.

Tabella 2.15 – Material (parametri)

Construction: attraverso questa classe di oggetti è possibile assemblare I vari strati di materiale definiti nella classe di oggetti precedente, partendo dagli strati più esterni e proseguendo verso quelli più interni.

Construction: Window Data File: con questo object vengono importate, nel modello dell' edificio, le finestre costruite con il software *Window5* (di cui parleremo nella sezione 2.3 del capitolo).
In Figura 2.16 viene illustrata la modalità di inserimento dei dati delle finestre, si dovranno compilare i campi "Name File" con il "nomefile.dat" (file creato in Window5) e il campo "Name" con il nome della finestra che vogliamo utilizzare (il nome si trova nel file *.dat creato).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		3 doppio SHGC bas	4 triplo SHGC bas	5 Triplo SHGC alt	7 PF 2 alto	6 PF 2 basso	9 PF 3 alto	8 PF 3 basso	2 Doppio SHGC alt
File Name		Doppio_SHGC_basso.dat	Triplo_SHGC_basso.dat	Triplo_SHGC_alto.dat	PF_2_alto.dat	PF_2_basso.dat	PF_3_alto.dat	PF_3_basso.dat	Doppio_SHGC_alto.dat

Figura 2.16 – IDF Editor, Class list, Construction Window Data File

2.2.3.5 Quinto Gruppo: "Thermal Zone and Surface"

Questo gruppo di object permette di definire le zone che compongono il modello da analizzare e il loro posizionamento, inoltre è possibile definire il numero e la posizione delle superfici opache e trasparenti che delimitano ogni singola zona.

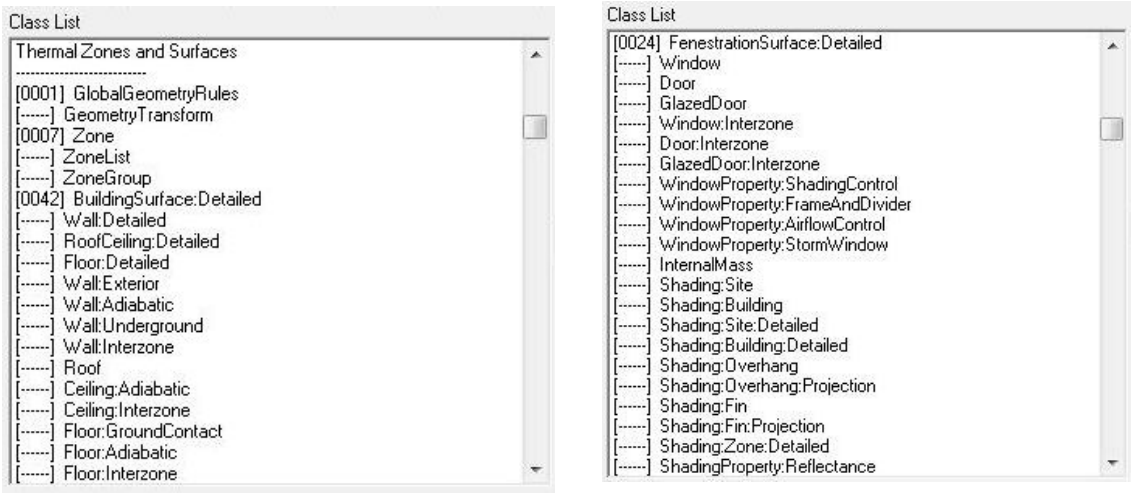


Figura 2.17 – IDF Editor, Class list, Thermal Zone and Surface

Global Geometry Rules: Questo oggetto consente di definire un sistema di riferimento che poi verrà utilizzato per inserire le coordinate dei vertici delle superfici e delle zone del modello.

In Figura 2.18 possiamo vedere raffigurato il sistema tridimensionale cartesiano utilizzato da EnergyPlus, tale sistema applica la "regola della mano destra" e fa si che "l'asse X" punta verso EST, "lasse Y" punta verso il NORD della zona mentre "l'asse Z" punta verso l'alto.

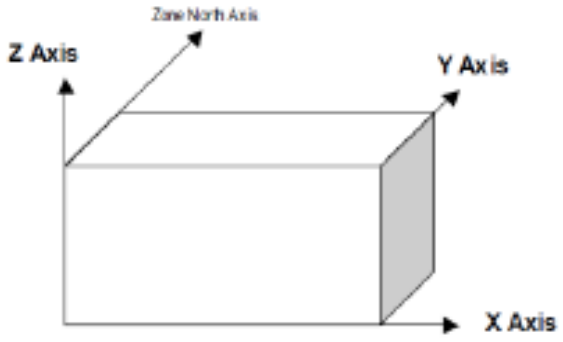


Figura 2.18 – Sistema di Riferimento Energy Plus

Nella seguente tabella (Tabella 2.19) vengono elencati e descritti i parametri scelti per la definizione delle coordinate dei vertici delle superfici e delle zone del modello.

Parametri	**Descrizione**
Starting Vertex Position	Vertice di partenza per la definizione della posizione delle superfici, nel nostro modello è stato selezionato *UpperLeftCorner* (angolo in alto a sinistra).
Vertex Entry Direction	Direzione utilizzata per l'inserimento dei vertici, nel nostro modello è stato selezionato il *verso antiorario*
Coordinate System	Il sistema di coordinate, che può essere definito in coordinate relative o assolute, il nostro modello è in *coordinate assolute*
Daylight Reference Point Coordinate System	Anche in questo caso si deve scegliere se impostare il sistema a coordinate assolute o relative
Rectangular Surface Coordinate System	Parametro che permette di definire le superfici attraverso rettangoli e non attraverso i vertici.

Tabella 2.19 – Global Geometry Rules (parametri e descrizione)

Zone: object che permette di definire le zone termiche che compongono l'edificio oggetto della simulazione, in Tabella 2.20 vengono elencati i parametri di questo object.

Parametri	**Descrizione**
Name	Nome della zona definita
Direction of Relative North	Angolo compreso tra le direzione nord dell'edificio e la direzione nord della zona
X,Y,Z Origin	Coordinate d'origine della zona rispetto alle coordinate d'origine dell'edificio
Multiplier	Fattore di moltiplicazione dei carichi della zona
Ceiling Height	Definizione dell'altezza della zona
Volume	Volume occupato dalla zona
Zone Inside Convection Algorithm	Imposta il tipo di algoritmo per il calcolo della convezione interna

Zone Outside Convection Algorithm	Imposta il tipo di algoritmo per il calcolo della convezione esterna
Part of Total Area	Considera o meno la zona nel calcolo del fabbisogno annuale energetico dell'intero edificio

Tabella 2.20 – Zone (parametri e descrizione)

Building Surface: Detailed : attraverso questo object si possono definire le caratteristiche delle pareti che compongono le zone definite nell'object precedente.

Parametri	**Descrizione**
Name	Nome della superficie che si vuole definire
Surface Type	Tipologia della superficie (wall, floor roof)
Construction Name	Si richiama il nome degli elementi definiti nell'object "Construction"
Zone Name	Si richiama una delle tipologie dell'object "Construction"
Outside Boundary Condition	Condizioni al contorno della superficie
Sun Exposure	Stabilisce se la superficie viene esposta al sole
Wind Exposure	Stabilisce se la superficie è soggetta al vento
View Factor to Ground	Fattore di vista con il terreno
Number of Vertices	Numero di vertici che compongono la superficie
Vertex # X,Y,Z – coordinate	Coordinate spaziali di ciascun vertice delle sottosuperfici definite

Tabella 2.21 – Building Surface Detailed (parametri e descrizione)

Fenestration Surface Detailed: object che permette l'introduzione nel modello delle sottosuperfici, "*subsurfaces",* che possono essere finestre, porte, ecc.

Nel nostro modello questo object è stato utilizzato unicamente per definire l'estensione delle superfici finestrate, nella tabella seguente (Tabella 2.22) vengono elencati i campi di tale object.

Parametri	Descrizione
Name	Nome della sottosuperficie
Surface Type	Tipologia della sottosuperficie, si può sciegliere tra: Window, Door, Glassdoor…
Construction Name	Questo parametro permette di scegliere l'elemento costruttivo da associare alla sottoparete
Building Surface Name	Nome della superficie nella quale si vuole posizionare la sottosuperficie che si sta definendo
Outside Boundary Condition Object	Informazioni aggiuntive relative alle condizioni al contorno
View Factor to Ground	Fattore di vista del terreno
Shading Control Name	Nome del controllo dell'ombreggiamento, in queste simulazioni non è stato utilizzato
Frame and Divider Name	Informazioni sul telaio e sui divisori delle finestre
Multiplier	Attraverso tale parametro si possono inserire più finestre sulla stessa superficie
Number of Vertices	Numero di vertici che definiscono la posizione della sottosuperficie
Vertex # X,Y,Z – coordinate	Coordinate spaziali di ciascun vertice delle sottosuperfici definite

Tabella 2.22 – Fenestration Surface Detailed (parametri)

2.2.3.6 Sesto Gruppo: "Advanced Surface Concepts"

Gruppo di oggetti che permette di definire in modo dettagliato le modalità di trasferimento del calore attraverso le superfici.

In Figura 2.23 sono elencati gli oggetti appartenenti a questo gruppo.

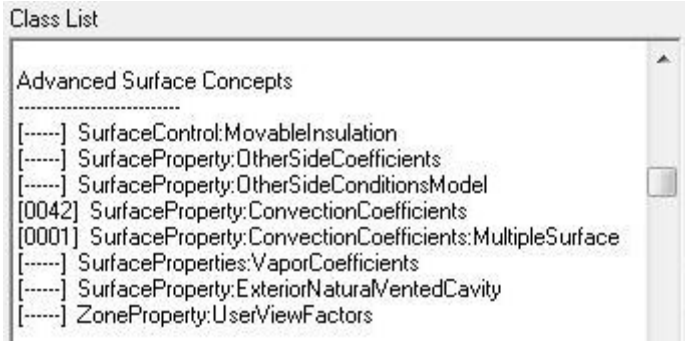


Figura 2.23 – IDF Editor, Class list, Advanced Surface Concepts

Surface Property: Convections Coefficents: object che definisce i coefficienti convettivi per ciascun superficie definita nel modello, immettendo i coefficienti in questo oggetto essi non vengono calcolati dal software.
Surface Property: Convections Coefficents:Multiple Surface: differisce dall'oggetto precedente perché consente di definire i coefficienti convettivi di una categoria di superfici (nel nostro caso le finestre).

2.2.3.7 Settimo Gruppo: "Internal Gains"

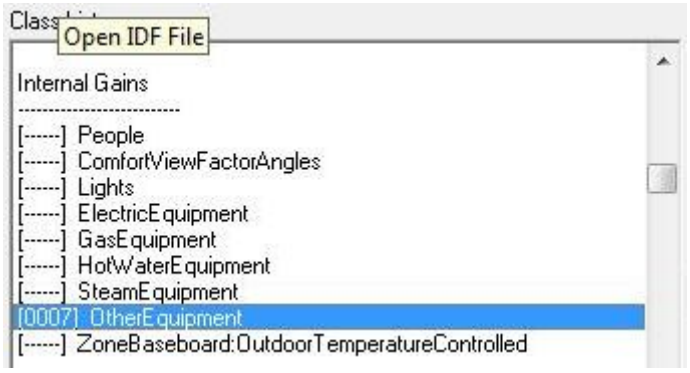


Figura 2.24 – IDF Editor, Class list, Internal Gains

Questo gruppo di oggetti definisce i carichi interni presenti nel modello di edificio oggetto delle simulazioni (presenza di persone, luci, ecc.), è importante definire la loro entità per avere una formulazione dei fabbisogni energetici più precisa.
Other Equipment: questo insieme di oggetti permette di definire i carichi in modo generico, cioè non è necessario specificare la loro natura.

2.2.3.8 Ottavo Gruppo: "Zone Airflow"

Insieme di objects che permette di definire i flussi d'aria tra le varie zone, considerando anche i flussi relativi alla ventilazione meccanica e naturale.

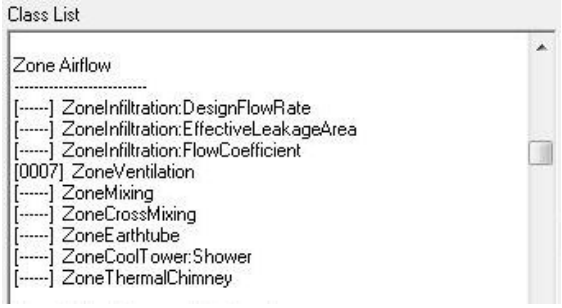


Figura 2.25 – IDF Editor, Class list, Zone Airflow

Zone ventilation: con questa categoria di oggetti è possibile definire una ventilazione semplice per ciascuna zona del modello, tale ventilazione può essere costante o variabile nel tempo (in funzione di una schedule, delle temperature interna ed eterna, della velocità del vento…).
Con l'utilizzo di altri object è possibile realizzare sistemi di ventilazione più complessi.

2.2.3.9 Nono Gruppo: "Zone HVAC controls and thermostats"
Gruppo di oggetti che consente di definire i setpoint di temperatura e i relativi sistemi di controllo di ciascuna zona, con relativa climatizzazione.

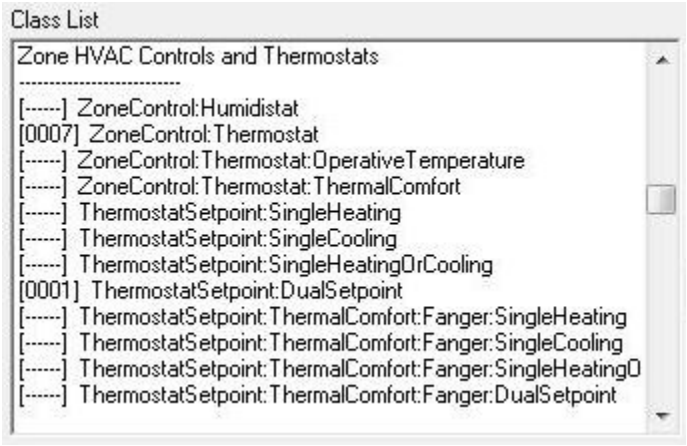


Figura 2.26 – IDF Editor, Class list, HVAC Controls and Thermostats

Zone Control Thermostats: raggruppamento di oggetti attraverso il quale è possibile impostare i sistemi di controllo della temperatura per qualsiasi zona, i parametri sono descritti in Tabella 2.27.

Parametri	**Descrizione**
Name	Sistema di controllo della temperatura che si vuole definire
Zone Name	Zona che viene controllata dal sistema che si sta per definire
Control Type Schedule Name	Tipologia di controllo che si desidera impostare.
Control 1 Object Type	Vengono ripresentate le opzioni di controllo presenti in quello appena descritto.

Control 1 Name	Questo parametro permette di scegliere la tipologia di setpoint (una volta definita negli object successivi)

Tabella 2.27 – Zone Control Thermostats (parametri)

Thermostat Setpoint: Dual Setpoint: object che definisce i limiti termici da imporre al sistema di controllo della temperatura, sia per il riscaldamento che per il raffrescamento (vedi Tabella 2.28).

Parametri	**Descrizione**
Name	Nome relativo alla tipologia di setpoint che si vuole definire (inserito poi nel Control1 name dell'object precedentemente descritto)
Heating Setpoint Temperature Schedule Name	Schedule che definisce la variazione temporale del setpoint di riscaldamento
Cooling Setpoint Temperature Schedule Name	Schedule che definisce la variazione temporale del setpoint di raffrescamento

Tabella 2.28 – Thermostats Setpoint (parametri)

2.2.3.10 Decimo Gruppo: "Zone HVAC Forced Air Units"

Gruppo di oggetti attraverso il quale è possibile definire le caratteristiche di un sistema di climatizzazione.

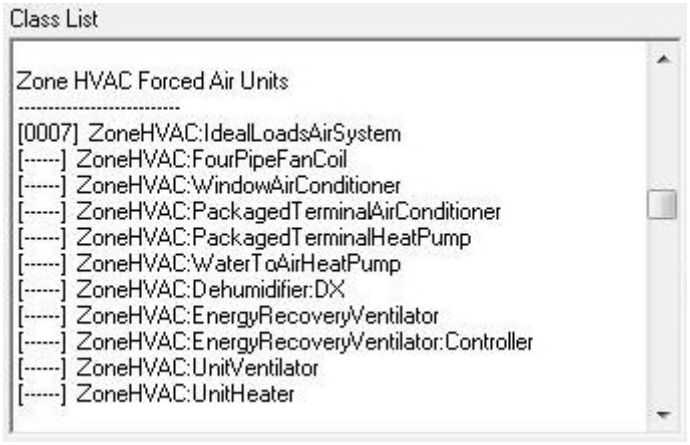


Figura 2.29 – IDF Editor, Class list, Zone HVAC Forced Air Units

Zone HVAC Ideal Load Air Sistem: in questo oggetto è descritto il sistema di climatizzazione ideale, che è il sistema più semplice tra quelli a disposizione.
In tale oggetto si devono inserire i seguenti parametri, ad esempio: nome, oggetto che fornisce di aria il sistema, temperatura di riscaldamento e raffrescamento, umidità specifica di riscaldamento e raffrescamento, potenza limite,ecc..

2.2.3.11 Undicesimo Gruppo: "Zone HVAC Equipment Connections"
Gruppo di object che permette di assegnare a ciascuna zona il proprio sistema di climatizzazione.

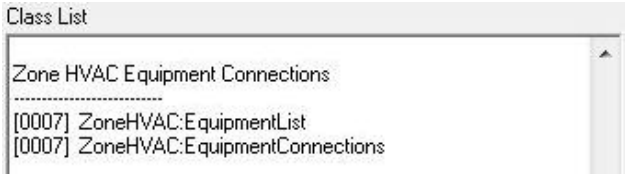


Figura 2.30 – IDF Editor, Class list, Zone HVAC Equipment Connections

Tramite l'object **Zone HVAC Equipment List** è possibile selezionare un impianto di climatizzazione tra quelli definiti nell'oggetto "Zone HVAC Ideal Load Air Sistem" precedentemente descritto; con l'altro oggetto di questo gruppo, **Zone HVAC Equipment Connections** , si associa il sistema di climatizzazione ad una definita zona termica del modello in esame.

2.2.3.12 Dodicesimo Gruppo: "Output Reporting"
Gruppo di oggetti attraverso il quale è possibile estrapolare, dai risultati della simulazione, variabili di output che risultano utili ai fini dell'analisi sul comportamento dell'edificio, in Figura 2.31 sono elencati i principali Outputs considerati in questo lavoro.

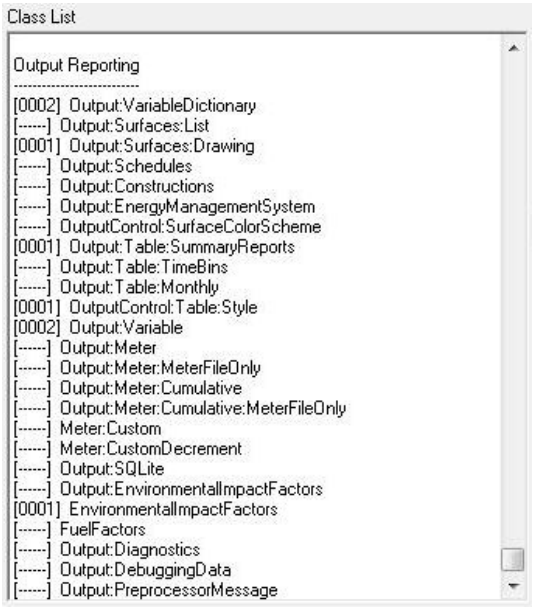


Figura 2.31 – IDF Editor, Class list, Output Reporting

Di seguito verranno spiegati i principali oggetti di questo gruppo.

Output: Variable Dictionary: oggetto che consente di scegliere ed elencare quali outputs selezionare per l'analisi, in Tabella 2.32 vengono definiti i parametri di tale oggetto.

Parametri	**Descrizione**
Key Field	Tipologia di output che s'intende selezionare. Le tipologie sono 2: *Regular* (variabili di default) e *IDF* (variabili definite dall'utente)
Sort Option	Tipo di visualizzazione delle variabili

Tabella 2.32 – Output Variable Dictionary

Output: Surfaces: Drawing: object che permette di indicare il formato dell'output grafico per la visualizzazione della struttura dell'edificio e delle sue zone.

Output: Table: Summary Reports: oggetto attraverso il quale è possibile selezionare e "stampare" gli outputs di interesse per l'analisi, ed aggregarli in delle tabelle riassuntive.

Nel nostro caso gli outputs selezionati sono: *Climatic Data Summary, Zone Cooling Summary Monthly, Zone Heating Summary Monthly, All Summary, Annual Buiding Utility Performanc eSummary, Componen tSizing Summary* e *Al lMonthly*.

Output Control: Table: Style: object con cui si può definire il formato (nel nostro caso si è scelto il formato HTML) e le unità di misura con i quali verranno stampati i dati di output.

Output: Variable: oggetto che permette di selezionare le variabili che poi verranno stampate nel file " **.csv* ".
Per le varie simulazioni sono state definite le variabili di output: *Zone/Sys Sensible Cooling Energy e Zone/Sys Sensible Heating Energy.*

I parametri dell'oggetto sono elencati in Tabella 2.33.

Parametri	**Descrizione**
Variable Name	In questo campo è possibile inserire il nome della variabile da stampare (nel nostro caso *Zone/Sys Sensible Cooling Energy e Zone/Sys Sensible Heating Energy*).
Reporting Frequency	Tale campo definisce la frequenza con cui verranno stampate le variabili (nel nostro caso si è scelto di considerare una cadenza mensile *Monthly*)

Tabella 2.33 – Output Variable (parametri e descrizione)

2.3 Window5

2.3.1 Descrizione Programma

Il software *Window5* è stato sviluppato dall'Università di Berkeley per lo studio e progettazione di superfici finestrate e per il calcolo degli indici di prestazione termica delle finestre (valori U, coefficienti di guadagno termico solare *SHGC*, coefficienti di ombreggiatura,…).

Window5 fornisce un metodo versatile per l'analisi del trasferimento del calore attraverso le finestre, coerentemente con la procedura di valutazione sviluppata dal NFRC (*National Fenestration Rating Council*) e compatibilmente con la norma ISO 15099.

Le funzioni che caratterizzano il software sono:

1. Capacità di analizzare superfici finestrate o strutture vetrate con qualsiasi combinazione di: strati di vetro, strati di gas nella camera dei vetrocamera, tipologia di telaio, tipologia di divisori o distanziali, condizione climatica e inclinazione.
2. Accesso diretto ai database contenenti: i componenti della finestra (sistemi di vetri, gas nella vetrocamera, tipologia di telaio e divisori vari), con le loro caratteristiche, e le varie condizioni ambientali.
   Il software accede al database di *Optics5*, che contiene i dati spettrali di molti materiali, tra cui i vetri.
3. Stampa dettagliata dei risultati delle prestazioni di una finestra o di un suo componente.
4. Possibilità di impostare le dimensioni e le proprietà termiche di ogni elemento che compone il telaio.
5. Compatibilità di formato dei dati e collegamento con i software *DOE 2.1* ed il software di simulazione dinamica *EnergyPlus.*

2.3.2 Schermata iniziale

Il programma, per creare una superficie finestrata o una struttura vetrata, inizialmente richiede di compilare i seguenti campi (visualizzabili in Figura 2.34, riquadro **A**):

- ID# = numero (progressivo) che identifica un sistema finestrato o struttura vetrata, essi una volta creati vengono inseriti in una lista.
- Name = nome che l'utente assegna al sistema finestrato creato.
- Mode = identificatore che determina lo status di approvazione del vetro, in questo momento l'unica modalità di approvazione è il sistema NFRC.
- Type = tipologia di sistema finestrato che si intende creare (finestra, portafinestra…), il software propone delle tipologie con misure e caratteristiche pre impostate oppure scegliendo le voci con la dicitura *Custom Single/Dual Vision* si possono impostare le dimensioni di altezza (*Height*) e larghezza (*Widht*).
- Tilt = campo che identifica l'inclinazione della struttura vetrata rispetto al piano orizzontale.
- Enviroment Condition = in questo campo si devono definire le condizioni ambientali a cui è soggetta la superficie finestrata.

Nel riquadro **B** di Figura 2.34 troviamo una rappresentazione grafica del sistema finestrato (o struttura vetrata) che abbiamo creato immettendo i nostri dati nei campi descritti in precedenza, in questo riquadro selezionando uno dei componenti della finestra si può accedere ad altre schermate (spiegate in seguito in questo capitolo) che consentono di definire e variare le caratteristiche e prestazioni dei componenti (telaio e vetro).

Sempre in Figura 2.34 (riquadro **C**), *Total Window Results*, troviamo il riassunto delle prestazioni del sistema finestrato, il software li calcola se l'utente fa partire l'analisi "cliccando" sul comando *Calc (F9)* presente nella lista di comandi sulla sinistra della schermata iniziale.

Nel riquadro **D** della schermata iniziale (Figura 2.34), *Click on a component to display the characteristics below,* appaiono le caratteristiche delle componenti del sistema che vengono selezionate: *Frame* (telaio), *Glazing System* (vetro).

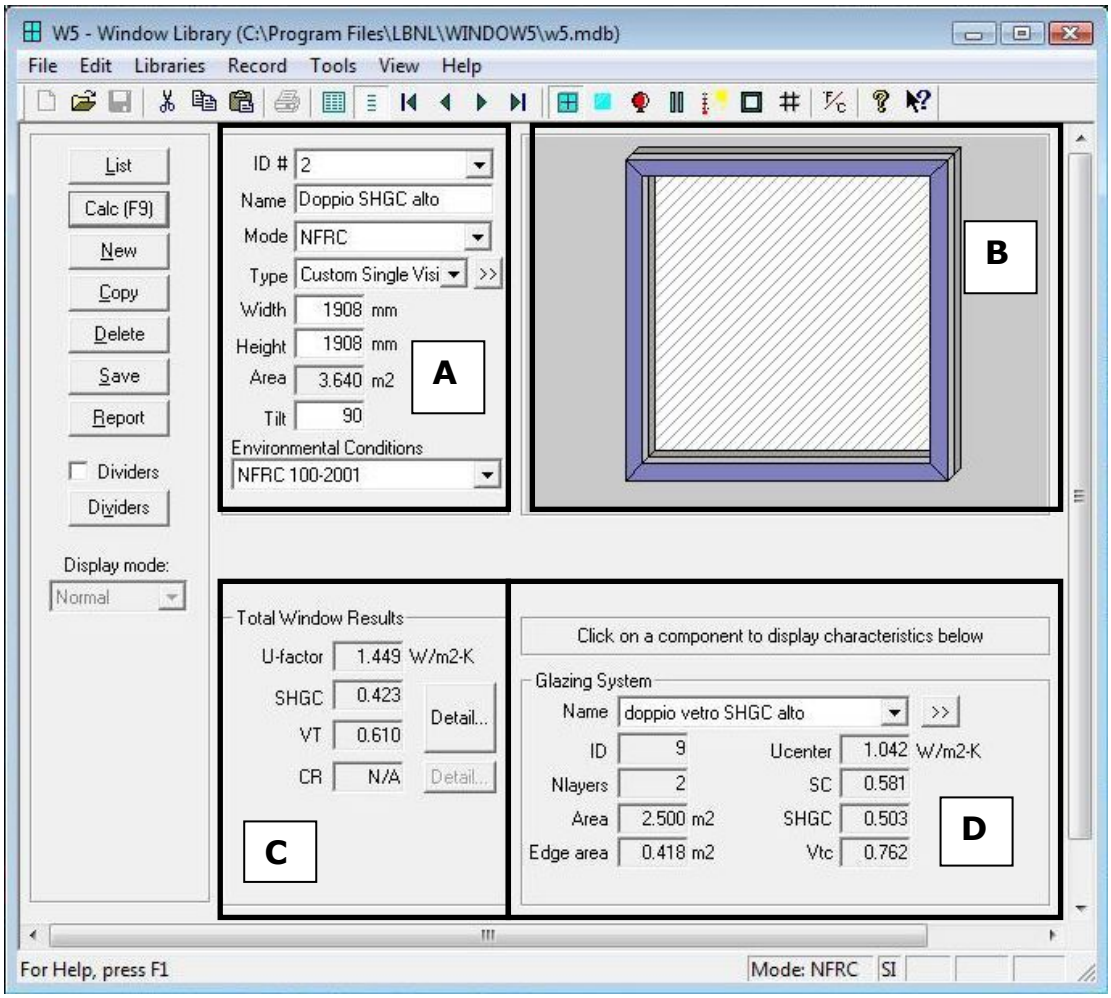


Figura 2.34 – Window5, Schermata Iniziale

2.3.2.1 Frame Library

A questa schermata si accede selezionando, nel riquadro B di Figura 2.34, la componente che rappresenta il telaio della finestra in analisi (vedi Figura 2.35).

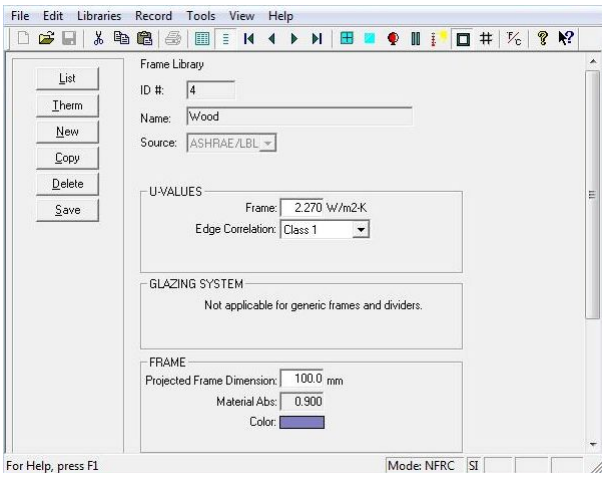


Figura 2.35 – Window5, Frame Library

In questa schermata si possono scegliere tipologie di telaio già esistenti nei database di Window5 oppure creare una nuova tipologia di telaio (quindi creare un nuovo ID# assegnandogli un nome) compilando i campi qui sotto elencati:

- *U-VALUES* si deve inserire il valore di trasmittanza termica del telaio, espresso in [W/m^2 K].
- *FRAME, Projected Frame Dimension,* si deve inserire lo spessore del telaio; nel campo sottostante.
- *FRAME, Material Abs*, si deve inserire l'assorbimento del materiale che compone il telaio.

2.3.2.2 Glazing System Library

Per accedere a questa schermata si deve selezionare, nel riquadro B di Figura 2.34, la componente che vetrata della finestra in analisi (vedi Figura 2.36).

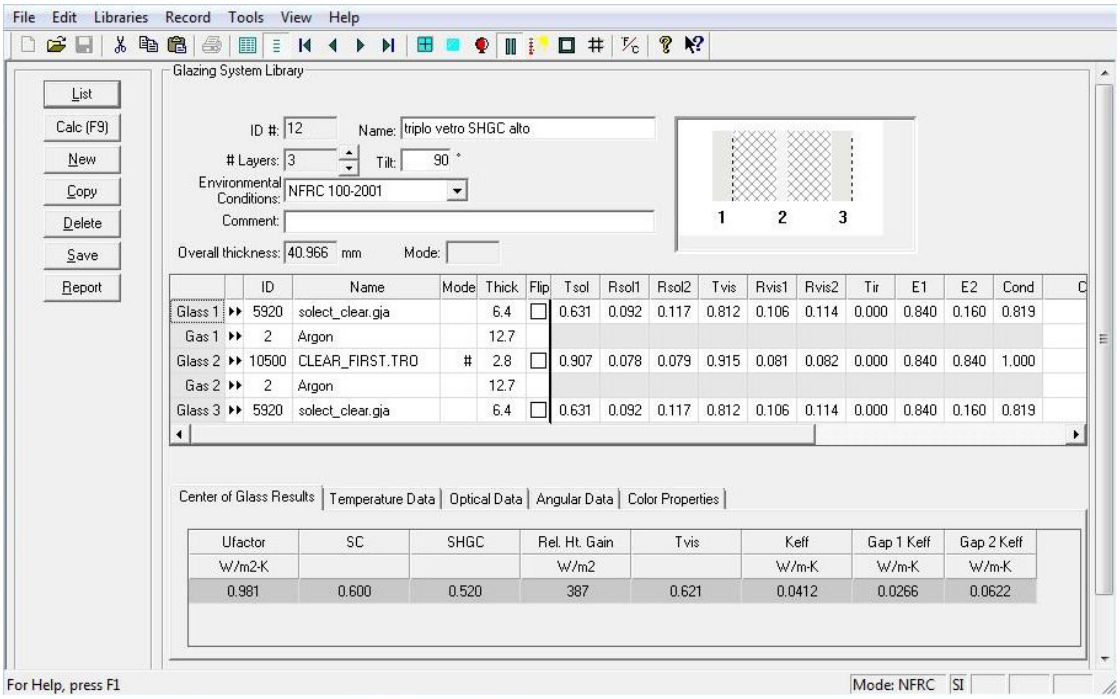

File Edit Libraries Record Tools View Help
Glazing System Library
List
Calc (F9)
New
Copy
Delete
Save
Report
ID #: 12
Name: triplo vetro SHGC alto
Layers: 3
Tilt: 90
Environmental Conditions: NFRC 100-2001
Comment:
Overall thickness: 40.966 mm
Mode:
1 2 3
ID Name Mode Thick Flip Tsol Rsol1 Rsol2 Tvis Rvis1 Rvis2 Tir E1 E2 Cond
Glass 1 5920 solect_clear.gja 6.4 0.631 0.092 0.117 0.812 0.106 0.114 0.000 0.840 0.160 0.819
Gas 1 2 Argon 12.7
Glass 2 10500 CLEAR_FIRST.TRO # 2.8 0.907 0.078 0.079 0.915 0.081 0.082 0.000 0.840 0.840 1.000
Gas 2 2 Argon 12.7
Glass 3 5920 solect_clear.gja 6.4 0.631 0.092 0.117 0.812 0.106 0.114 0.000 0.840 0.160 0.819
Center of Glass Results
Temperature Data
Optical Data
Angular Data
Color Properties
Ufactor SC SHGC Rel. Ht. Gain Tvis Keff Gap 1 Keff Gap 2 Keff
W/m2-K W/m2 W/m-K W/m-K W/m-K
0.981 0.600 0.520 387 0.621 0.0412 0.0266 0.0622
For Help, press F1
Mode: NFRC
SI

Figura 2.36 – Window5, Glazing System Library

Anche per quanto riguarda la parte relativa ai *Glazing System* si possono adottare dei sistemi vetrati già presenti nel database del software, oppure si può creare il proprio sistema vetrato.

Le operazioni necessarie a creare il proprio sistema vetrato sono elencate di suguito:

- Assegnazione di un nuovo *ID#* (identificatore) e di un *Name* (nome) al sistema che si sta creando.
- Definizione di *# Layers* (numero di vetri), *Tilt* (inclinazione) e *Enviromental Conditions* (condizioni ambientali) del sistema.
- Tipologia di vetro, *Glass 1,2,…*, che compone lo strato selezionato, tale scelta deve avvenire nei vetri contenuti nel database del software (Figura 2.37).

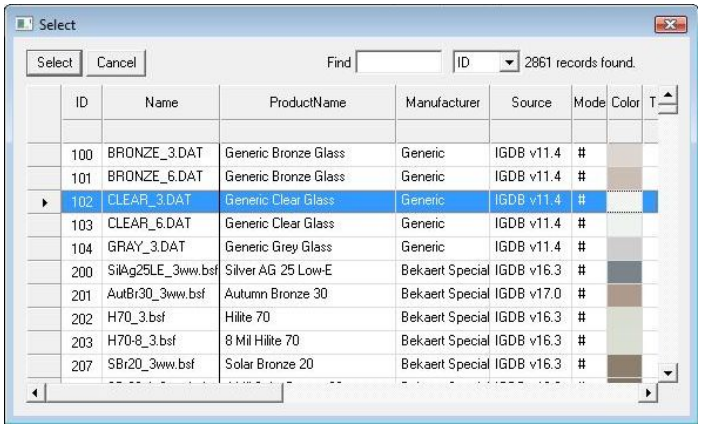

Select
Select
Cancel
Find
ID
2861 records found.
ID Name ProductName Manufacturer Source Mode Color
100 BRONZE_3.DAT Generic Bronze Glass Generic IGDB v11.4 #
101 BRONZE_6.DAT Generic Bronze Glass Generic IGDB v11.4 #
102 CLEAR_3.DAT Generic Clear Glass Generic IGDB v11.4 #
103 CLEAR_6.DAT Generic Clear Glass Generic IGDB v11.4 #
104 GRAY_3.DAT Generic Grey Glass Generic IGDB v11.4 #
200 SilAg25LE_3ww.bsf Silver AG 25 Low-E Bekaert Special IGDB v16.3 #
201 AutBr30_3ww.bsf Autumn Bronze 30 Bekaert Special IGDB v17.0 #
202 H70_3.bsf Hilite 70 Bekaert Special IGDB v16.3 #
203 H70-8_3.bsf 8 Mil Hilite 70 Bekaert Special IGDB v16.3 #
207 SBr20_3ww.bsf Solar Bronze 20 Bekaert Special IGDB v16.3 #

Figura 2.37 – Window5, Glazing System Library, Select Glass

- Tipologia di gas, *Gas 1,2,…*, presente all'interno della vetrocamera, anche questa scelta deve essere fatta all'interno del database del software (Figura 2.38).

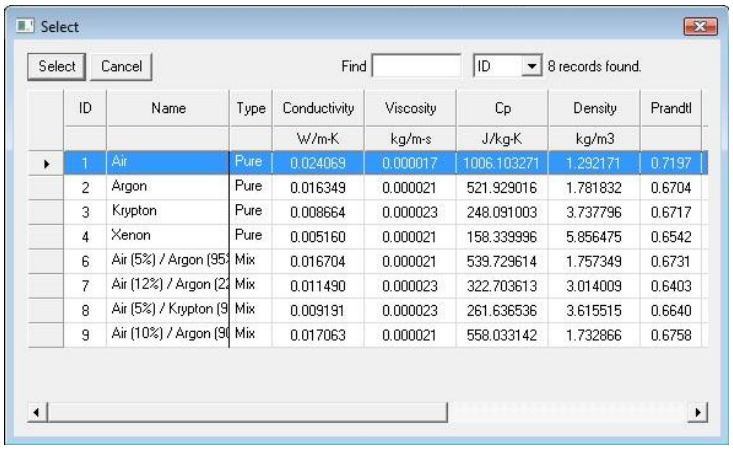


Figura 2.38 – Window5, Glazing System Library, Select Gas

2.3.3 Schermata Output

Per accedere poter utilizzare il file creato nel software *Energy Plus* l'utente deve eseguire il *Report* (Figura 2.39), nel quale si seleziona il formato in cui il report deve essere eseguito (nel nostro caso si sceglie Energy Plus).

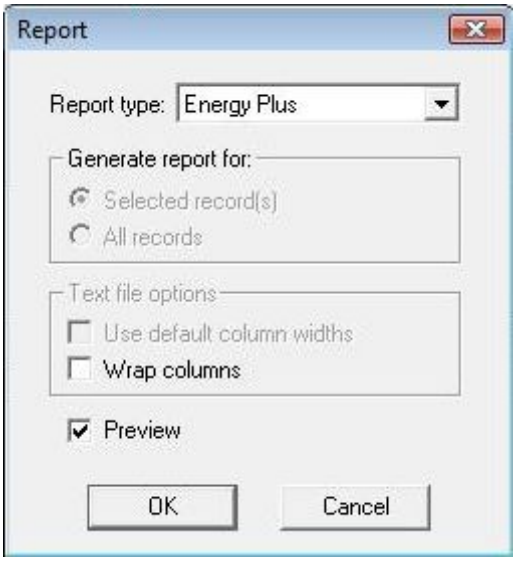


Figura 2.39 – Window5, Report

La schermata successiva (Figura 2.40) permette di visualizzare l'output che contiene tutte le informazioni della finestra creata:

- Window name : nome della finestra, questo è il nome che dovrà essere riportato in Energy Plus nella sezione *"Construction: Window Data File"* nel campo *"Name".*
- Description : descrizione della tipologia di finestra (viene riportata la scelta fatta nella schermata iniziale nel campo *Type*).
- System : informazioni relative al sistema telaio.
- Glazing system : informazioni relative al vetro.

Il file ottenuto dal *Report* è in formato **.txt*, per essere utilizzato in Energy Plus deve essere salvato in formato **.dat* nella cartella del programma Energy Plus perché sono degli input per le simulazioni.

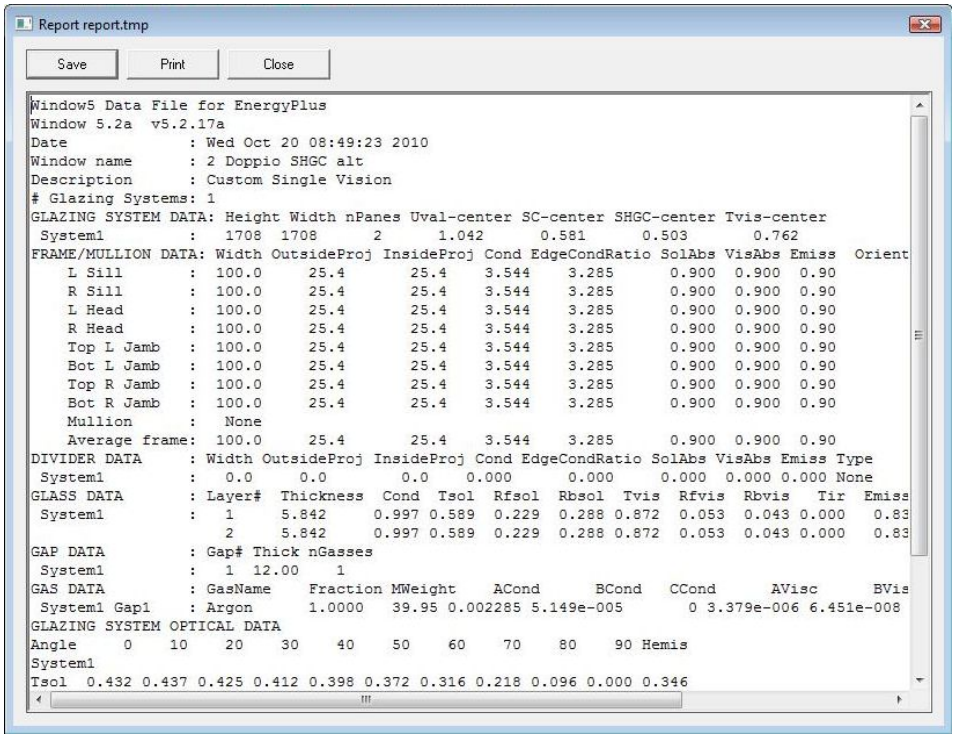

Report report.tmp
Save
Print
Close
Window5 Data File for EnergyPlus
Window 5.2a v5.2.17a
Date : Wed Oct 20 08:49:23 2010
Window name : 2 Doppio SHGC alt
Description : Custom Single Vision
Glazing Systems: 1
GLAZING SYSTEM DATA: Height Width nPanes Uval-center SC-center SHGC-center Tvis-center
System1 : 1708 1708 2 1.042 0.581 0.503 0.762
FRAME/MULLION DATA: Width OutsideProj InsideProj Cond EdgeCondRatio SolAbs VisAbs Emiss Orient
L Sill : 100.0 25.4 25.4 3.544 3.285 0.900 0.900 0.90
R Sill : 100.0 25.4 25.4 3.544 3.285 0.900 0.900 0.90
L Head : 100.0 25.4 25.4 3.544 3.285 0.900 0.900 0.90
R Head : 100.0 25.4 25.4 3.544 3.285 0.900 0.900 0.90
Top L Jamb : 100.0 25.4 25.4 3.544 3.285 0.900 0.900 0.90
Bot L Jamb : 100.0 25.4 25.4 3.544 3.285 0.900 0.900 0.90
Top R Jamb : 100.0 25.4 25.4 3.544 3.285 0.900 0.900 0.90
Bot R Jamb : 100.0 25.4 25.4 3.544 3.285 0.900 0.900 0.90
Mullion : None
Average frame: 100.0 25.4 25.4 3.544 3.285 0.900 0.900 0.90
DIVIDER DATA : Width OutsideProj InsideProj Cond EdgeCondRatio SolAbs VisAbs Emiss Type
System1 : 0.0 0.0 0.0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 None
GLASS DATA : Layer# Thickness Cond Tsol Rfsol Rbsol Tvis Rfvis Rbvis Tir Emiss
System1 : 1 5.842 0.997 0.589 0.229 0.288 0.872 0.053 0.043 0.000 0.83
2 5.842 0.997 0.589 0.229 0.288 0.872 0.053 0.043 0.000 0.83
GAP DATA : Gap# Thick nGasses
System1 : 1 12.00 1
GAS DATA : GasName Fraction MWeight ACond BCond CCond AVisc BVis
System1 Gap1 : Argon 1.0000 39.95 0.002285 5.149e-005 0 3.379e-006 6.451e-008
GLAZING SYSTEM OPTICAL DATA
Angle 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 Hemis
System1
Tsol 0.432 0.437 0.425 0.412 0.398 0.372 0.316 0.218 0.096 0.000 0.346

Figura 2.40 – Window5, Report, Output

CAPITOLO 3.
MODELLI E PIANO DELLE SIMULAZIONI

3.1 Introduzione

Il capitolo è diviso in due parti: la prima che descrive i modelli di edificio e il modello delle simulazioni, la seconda che descrive il piano di simulazioni che è stato seguito.

Ad inizio capitolo è presente una descrizione degli elementi comuni a tutte le tipologie di edificio analizzate e comuni ai modelli di edificio oggetto delle simulazioni.

Si prosegue con la descrizione del piano delle simulazioni che è stato seguito nell'analisi.

I fattori considerati nel piano delle simulazioni sono elencati in Tabella 3.1:

Fattore	**Variabilità**
Forma e Direzione prevalente della pianta dell'edificio	7
Estensione della superficie vetrata	3
Distribuzione dell'area vetrata	3
Località	3
Stratigrafia delle pareti	3
Tipologia finestra	4
Totale simulazioni	**2268 (max)**

Tabella 3.1 – Fattori simulazioni (elenco)

La variabilità di casi considerata nel piano delle simulazioni fa si che ci sia un elevato numero di configurazioni dell'edificio, ciò è legato al fatto che si vogliono studiare tutte le possibili combinazioni e iterazioni tra i vari livelli dei fattori in esame.

L'elevata numerosità dei casi analizzati permetterà di effettuare delle valide analisi di tipo statistico descrittivo e inferenziale, che verranno trattate nel Capitolo 4, che consentiranno di caratterizzare il peso delle diverse variabili considerate nell'analisi.

3.2 Descrizione dei modelli di edifici

3.2.1 Ipotesi e informazioni generali sui modelli di edificio

Involucro edilizio:

Tutti gli edifici oggetto delle simulazioni dinamiche, eseguite al software *EnergyPlus*, sono formati da un'unica zona termica e corrispondono ad un unico modulo di un solo piano.

L'estensione della superficie netta in pianta dell'edificio è di 100 m^2 e ha un volume complessivo di 300 m^3 (poiché l'altezza dell'edificio è pari a 3 m).

Nelle simulazioni non è stato considerato alcun tipo di ponte termico e scambio termico con il terreno, per questo motivo sia il pavimento che la copertura sono stati considerati esposti all'ambiente esterno con un contributo di radiazione solare sul solaio di copertura.

Le pareti dell' edificio, che costituiscono l'involucro opaco, sono composte da una struttura bistrato: internamente troviamo uno strato di laterizio (spessore costante, 20 cm, in tutti i casi simulati), verso l'esterno invece è stato applicato uno strato di materiale isolante (cappotto esterno) con caratteristiche simili al polistirene (spessore variabile: 5 cm, 10 cm, 15 cm a seconda del modello analizzato).

Le strutture finestrate, considerate nel modello, sono state modellate utilizzando il software *Window5*.

Sono stati considerati due distinti moduli finestrati. Le dimensioni della prima tipologia misurano complessivamente 1908 x 1908 mm, la superficie del telaio in legno è di 0.181 m^2 con estensione della superficie vetrata è pari a 2.92 m^2 .

La seconda tipologia è rappresentata da portefinestre che misurano 2482 mm in larghezza e 2650 mm in altezza, la superficie del telaio in legno di questi sistemi è di 0.122 m^2 e l'estensione della superficie vetrata è pari a 6,07 m^2.

I vetri montati sulle finestre e portefinestre sono divisi in 2 gruppi (Doppio Vetro e Triplo Vetro) all'interno dei quali si sono distinti altri 2 gruppi (SHGC Alto e SHGC Basso).

Il parametro *SHGC –Solar Heat Gain Coefficent-* è il coefficiente di guadagno termico solare.
Il SHGC è la frazione di radiazione solare incidente che entra attraverso una finestra, sia direttamente trasmessa che assorbita e poi rilasciata verso l'interno.
Il SHGC ha valore compreso tra 0 e 1 perciò un minor valore implica che è minore il guadagno di energia proveniente dall'irradiazione solare.
Il metodo di valutazione del SHGC riconosciuto dal NFRC (*National Fenestration Rating Council*) include nel calcolo del coefficiente anche il telaio della finestra abbassando il valore massimo del coefficiente a 0.8.
Nel Paragrafo 3.2.5 relativo alle superfici finestrate verranno presentate in modo più approfondito le caratteristiche di tali sistemi.

Temperature di setpoint di riscaldamento e di raffrescamento:
Le temperature di setpoint, sia di raffrescamento che di riscaldamento, sono un altro importante input per i nostri modelli.
Il setpoint per la temperatura di riscaldamento e per la temperatura di raffrescamento sono stati fissati a 20 °C e 26 °C secondo le indicazioni dello standard europeo UNI EN ISO 13790 per quanto riguarda gli edifici a destinazione d'uso residenziale.
La temperatura interna della zona studiata deve rimanere dentro tale range di valori perché non ci siano apporti di flussi termici da parte dell'impianto di climatizzazione, questo approccio non è definito nella normativa di riferimento.

Capacità dell'impianto di climatizzazione:
Per l'impianto di climatizzazione è stata ipotizzata una potenza illimitata perché è stato studiato il comportamento dell'involucro edilizio e non dell'impianto di climatizzazione.

Ventilazione e apporti interni:
I valori relativi alla ventilazione e all'entità degli apporti gratuiti interni sono stati impostati facendo riferimento alla norma UNI/TS 11300-1.
Per quanto riguarda l'entità degli apporti termici interni, per edifici con superficie utile di pavimento A_f inferiore a 170 m^2 , la norma consiglia di adottare la seguente relazione:

$$\Phi_{int} = 5.294 \times A_f - 0.01557 \times A_f^2 = 5.294 \times 100 - 0.01557 \times 100^2 = 373.7\,W$$

Il carico totale derivante dagli apporti interni è considerato interamente convettivo in modo che il contributo degli apporti gratuiti interni, agli scambi radiali interni, sia riconducibile interamente alla radiazione solare entrante dalle superfici trasparenti.

Per la ventilazione, in caso di aerazione naturale la norma consiglia di assumere un tasso costante di ricambio d'aria costante, per edifici residenziali, pari a 0,3 vol/h.

3.2.2 Fattori delle simulazioni

Nella Tabella 3.2 riportata di seguito sono dettagliati i fattori presi in considerazione nelle varie simulazioni eseguite.

Ogni fattore dell'analisi presenta un certo numero di alternative (variabilità).

Le molteplici combinazioni di tali fattori hanno permesso di creare modelli di involucro edilizio con caratteristiche differenti, permettendo di aumentare la numerosità dei casi studiati.

<table>
<tr><th>Fattore</th><th>Descrizione</th><th>Variabilità</th></tr>
<tr><td>Forma e Direzione prevalente della pianta dell'edificio</td><td>Sono mantenuti costanti il volume della zona (pari a 300 m^3 e l’estensione della superficie in pianta (pari a 100 m^2), viene variata la forma e il rapporto tra i lati della pianta, come riportato nella seguente tabella:
<table><tr><td>Soluzione</td><td>Rapporto tra i lati</td><td>s/v netto</td></tr><tr><td>Pianta quadrata</td><td>1:1</td><td>1.066</td></tr><tr><td>Pianta rettangolare 1</td><td>3:4</td><td>1.071</td></tr><tr><td>Pianta rettangolare 2</td><td>1:2</td><td>1.091</td></tr><tr><td>Pianta rettangolare 3</td><td>1:4</td><td>1.166</td></tr></table>
Per quanto riguarda le orientazioni prevalenti abbiamo:
<table><tr><td>Soluzione</td><td>Orientazione</td></tr><tr><td>Orientazione 1</td><td>E/O</td></tr><tr><td>Orientazione 2</td><td>N/S</td></tr></table>
Complessivamente 4 x 2 = 8 possibilità, che si riducono a 7 in quanto la pianta quadrata non ha un’orientazione prevalente.</td><td>7</td></tr>
<tr><td>Percentuale di area vetrata</td><td>La percentuale di superficie vetrata è indicata in rapporto alla superficie netta:
<table><tr><td>Soluzione</td><td>Percentuale vetrata sulla superficie del pavimento</td></tr><tr><td>Percentuale 1</td><td>11.66% (=11.66 m^2)</td></tr><tr><td>Percentuale 2</td><td>17.49% (=17.49 m^2)</td></tr><tr><td>Percentuale 3</td><td>23.32% (=23.32 m^2)</td></tr></table></td><td>3</td></tr>
<tr><td>Distribuzione dell’area vetrata</td><td>Vengono prese in considerazione 3 possibili varianti:
<table><tr><td>Soluzione</td><td>Descrizione</td></tr><tr><td>Sud</td><td>Solo finestre a sud</td></tr><tr><td>Est</td><td>Solo finestre ad est</td></tr><tr><td>Ovest</td><td>Solo finestre ad ovest</td></tr></table></td><td>3</td></tr>
</table>

<table>
<tr>
<td>Gradi giorno delle località</td>
<td>Vengono esaminate 3 località, una del Sud Italia, una del Centro e una del Nord:
<table>
<tr><td>Località</td><td>GG</td></tr>
<tr><td>Messina</td><td>707</td></tr>
<tr><td>Roma</td><td>1415</td></tr>
<tr><td>Milano</td><td>2404</td></tr>
</table>
</td>
<td>3</td>
</tr>
<tr>
<td>Stratigrafia delle pareti</td>
<td>Vengono prese in considerazioni pareti bistrato con le seguenti caratteristiche termo fisiche:

Laterizio
<table>
<tr><td>Conduttività termica</td><td>0.25 W/m K</td></tr>
<tr><td>Densità</td><td>850 kg/m^3</td></tr>
<tr><td>Calore specifico</td><td>840 J/kg K</td></tr>
</table>
Isolante
<table>
<tr><td>Conduttività termica</td><td>0.04 W/m K</td></tr>
<tr><td>Densità</td><td>40 kg/m^3</td></tr>
<tr><td>Calore specifico</td><td>1470 J/kg K</td></tr>
</table>
Strutture (dall’esterno verso l’interno):
<table>
<tr><td>1</td><td>5 cm isolante + 20 cm laterizio</td></tr>
<tr><td>2</td><td>10 cm isolante + 20 cm laterizio</td></tr>
<tr><td>3</td><td>15 cm isolante + 20 cm laterizio</td></tr>
</table>
</td>
<td>3</td>
</tr>
<tr>
<td>Tipologia finestra</td>
<td>4 casi modellati al software Window5:
<table>
<tr><td></td><td>U_g [W/m^{2}K]</td><td>SHGC</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Doppio vetro</td><td>1.097</td><td>0.506</td></tr>
<tr><td>1.102</td><td>0.328</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Triplo vetro</td><td>0.981</td><td>0.520</td></tr>
<tr><td>0.675</td><td>0.323</td></tr>
</table>
</td>
<td>4</td>
</tr>
<tr>
<td>Totale simulazioni</td>
<td></td>
<td>2268 (max)</td>
</tr>
</table>

Tabella 3.2 – Fattori delle simulazioni (descrizione)

Per una determinata località il parametro "gradi giorno" (GG) rappresenta il fabbisogno termico di un'area geografica relativa alle normative vigenti sul riscaldamento - raffrescamento delle abitazioni.
Il valore numerico rappresenta la somma delle differenze giornaliere (solo positive o solo negative) tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20 °C, e la temperatura media giornaliera esterna.
La somma delle differenze giornaliere, tra le due temperature, viene eseguita per tutti i giorni del periodo annuale convenzionale.
Un valore basso indica un breve periodo di riscaldamento/raffreddamento e temperature medie giornaliere prossime alla temperatura fissata per l'ambiente.
Al contrario, valori elevati, indicano periodi di riscaldamento/raffreddamento prolungati e temperature medie giornaliere nettamente inferiori/superiori rispetto alla temperatura di riferimento.

Le simulazioni eseguite sono state 1729, nel *Paragrafo 3.3.1* verrà approfondito il discorso e verrà spiegato perché sono meno di quelle previste.

3.2.3 Tipologia edificio

Alla base delle simulazioni eseguite c'è la semplificazione della struttura dell'edificio, esso è stato considerato come un unico modulo elementare composto da un'unica zona termica.

In Tabella 3.3 sono riportate le sette tipologie di edificio delle quali è descritta la forma della pianta, il rapporto tra i lati e le loro dimensioni, la superficie delle pareti considerate, l'orientazione prevalente e il rapporto superfici/volume che è il rapporto tra la superficie disperdente e il volume dell'ambiente confinato, a parità di volume, un S/V più alto significa che l'ambiente disperde di più verso l'esterno (nei calcoli delle superfici delle pareti laterali è già stata considerata l'altezza della parete).

Pianta Edificio	Rapporto Lati	Orientazione Prevalente	Lati superfici [m]		Superfici [m^2]		Sup / Vol
			Lati N/S	Lati E/O	Parete N/S	Parete E/O	
Pianta quadrata	1:1	-	10.00	10.00	30.00	30.00	1.067
Pianta rettangolare	3:4	N/S	8.66	11.55	25.98	34.64	1.071
		E/O	11.55	8.66	34.64	25.98	1.071
Pianta rettangolare	1:2	N/S	7.07	14.14	21.21	42.43	1.091
		E/O	14.14	7.07	42.43	21.21	1.091
Pianta rettangolare	1:4	N/S	5.00	20.00	15.00	60.00	1.167
		E/O	20.00	5.00	60.00	15.00	1.167

Tabella 3.3 – Tipologie di edificio, caratteristiche

In Figura 3.4 sono rappresentate graficamente le sette tipologie di edificio, con orientazione, forma e dimensioni descritte in Tabella2.3.

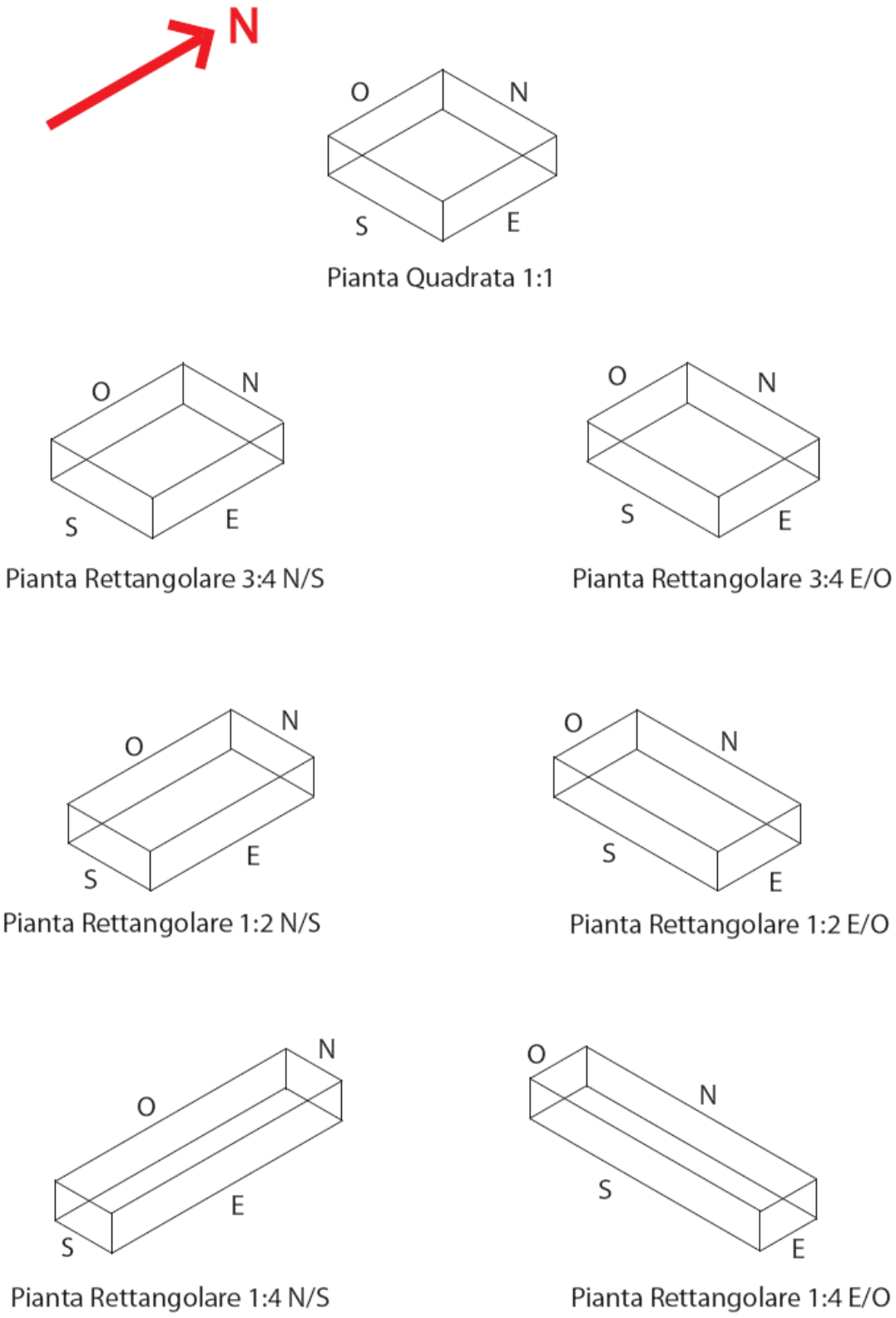


Figura 3.4 – Tipologie di edificio, orientazioni

3.2.4 Struttura e caratteristiche delle pareti

In Tabella 3.5 sono riportate le caratteristiche termo fisiche delle varie superfici opache dell'edificio, sia per il lato interno che per il lato esterno.

Superficie opaca	**Caratteristica**	**Valore**
Superfici verticali (lato interno)	Coefficiente di assorbimento radiazioni solari e coefficiente di assorbimento della luce visibile	0.3
	Emissività	0.9
	Coefficiente convettivo	2.5 $W/m^2 \cdot K$
Superfici verticali (lato esterno)	Coefficiente di assorbimento radiazioni solari e coefficiente di assorbimento della luce visibile	0.6
	Emissività	0.9
	Coefficiente convettivo	20 $W/m^2 \cdot K$
Copertura-soffitto (lato interno)	Coefficiente di assorbimento radiazioni solari e coefficiente di assorbimento della luce visibile	0.3
	Emissività	0.9
	Coefficiente convettivo	5 $W/m^2 \cdot K$
Copertura-soffitto (lato esterno)	Coefficiente di assorbimento radiazioni solari e coefficiente di assorbimento della luce visibile	0.6
	Emissività	0.9
	Coefficiente convettivo	20 $W/m^2 \cdot K$
Pavimento (lato interno)	Coefficiente di assorbimento radiazioni solari e coefficiente di assorbimento della luce visibile	0.6
	Emissività	0.9
	Coefficiente convettivo	0.7 $W/m^2 \cdot K$
Pavimento (lato esterno)	Coefficiente di assorbimento radiazioni solari e coefficiente di assorbimento della luce visibile	0
	Emissività	0.9
	Coefficiente convettivo	20 $W/m^2 \cdot K$

Tabella 3.5 – Caratteristiche termo fisiche delle pareti dell'edificio

- Il coefficiente di assorbimento sulle pareti è 0.3 e sul pavimento è 0.6 perché si suppone che la radiazione entrante cada sul pavimento e venga assorbita in gran parte dal pavimento, in misura minore sulle altre pareti le eventuali quote riflesse.
- L'emissività è convenzionalmente 0,9 per le pareti opache.
- I coefficienti convettivi sono scelti sulla base delle indicazioni dello standard europeo UNI EN ISO 6946.

3.2.5 Struttura e caratteristiche delle superfici finestrate

Come abbiamo già detto in precedenza, nel Paragrafo 3.2.2, ci sono:

- Tre estensioni di superficie vetrata analizzate: 11.66 m^2, 17.49 m^2 e 23.32 m^2.
- Quattro tipologie di vetro di cui due doppi vetri e due tripli vetri, sia per i doppi ch per i tripli si sono distinti i casi SHGC alto e basso (guadagno termico solare del vetro).
- Due tipi di serramento: finestra e portafinestra, in modo da avere più casi possibili per l'analisi.

3.2.5.1 Estensione delle superfici vetrate

Nelle figure riportate di seguito vengono illustrate le disposizioni delle superfici vetrate sulle pareti delle varie tipologie di edificio.

In Figura 3.6 troviamo la disposizione di superficie vetrata pari a 11.66 m^2:

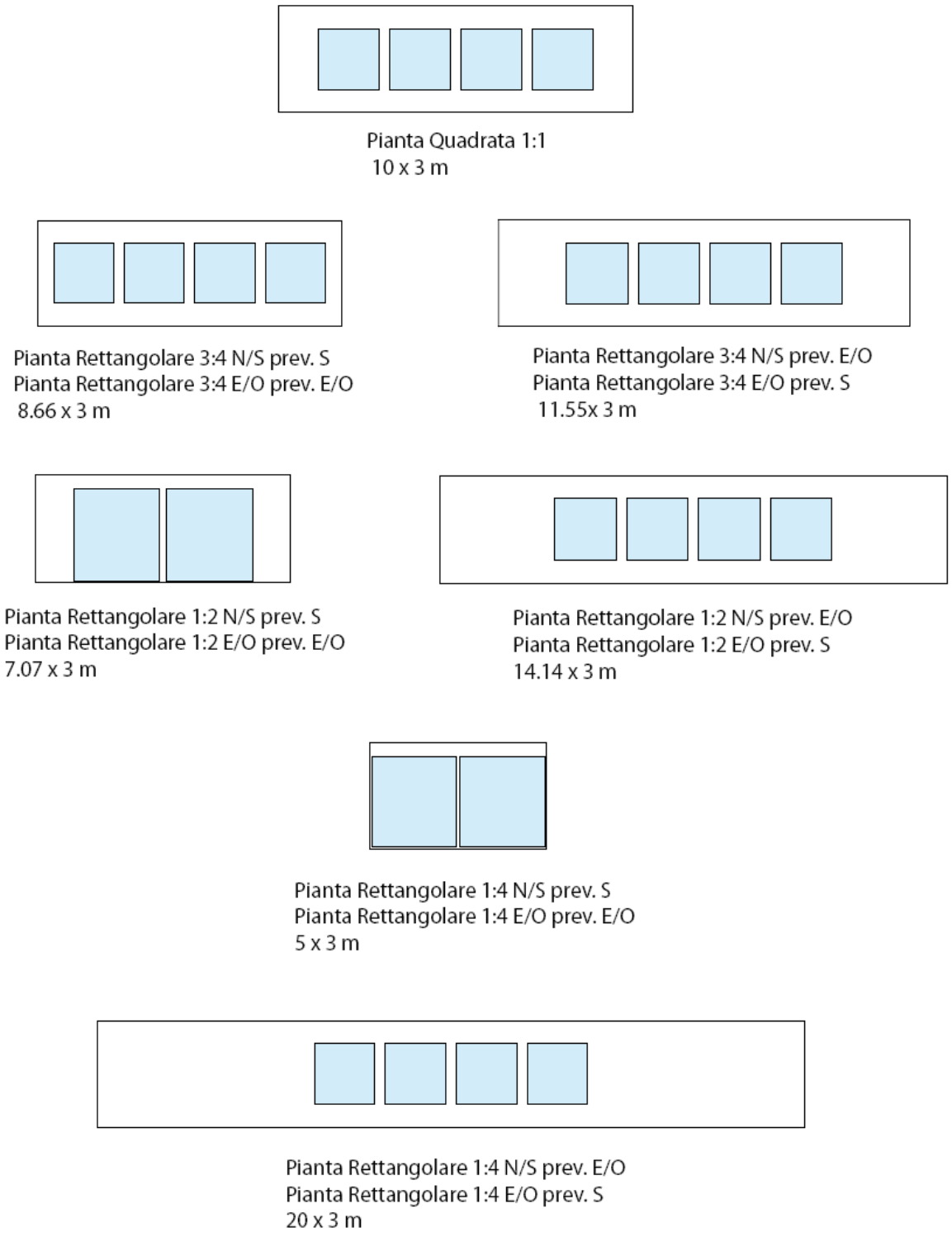

Pianta Quadrata 1:1
10 x 3 m
Pianta Rettangolare 3:4 N/S prev. S
Pianta Rettangolare 3:4 E/O prev. E/O
8.66 x 3 m
Pianta Rettangolare 3:4 N/S prev. E/O
Pianta Rettangolare 3:4 E/O prev. S
11.55x 3 m
Pianta Rettangolare 1:2 N/S prev. S
Pianta Rettangolare 1:2 E/O prev. E/O
7.07 x 3 m
Pianta Rettangolare 1:2 N/S prev. E/O
Pianta Rettangolare 1:2 E/O prev. S
14.14 x 3 m
Pianta Rettangolare 1:4 N/S prev. S
Pianta Rettangolare 1:4 E/O prev. E/O
5 x 3 m
Pianta Rettangolare 1:4 N/S prev. E/O
Pianta Rettangolare 1:4 E/O prev. S
20 x 3 m

Figura 3.6 – Disposizione superficie vetrata 11.66 m^2

In Figura 3.7 è rappresentata la disposizione delle superfici vetrate pari a 17.49 m^2:

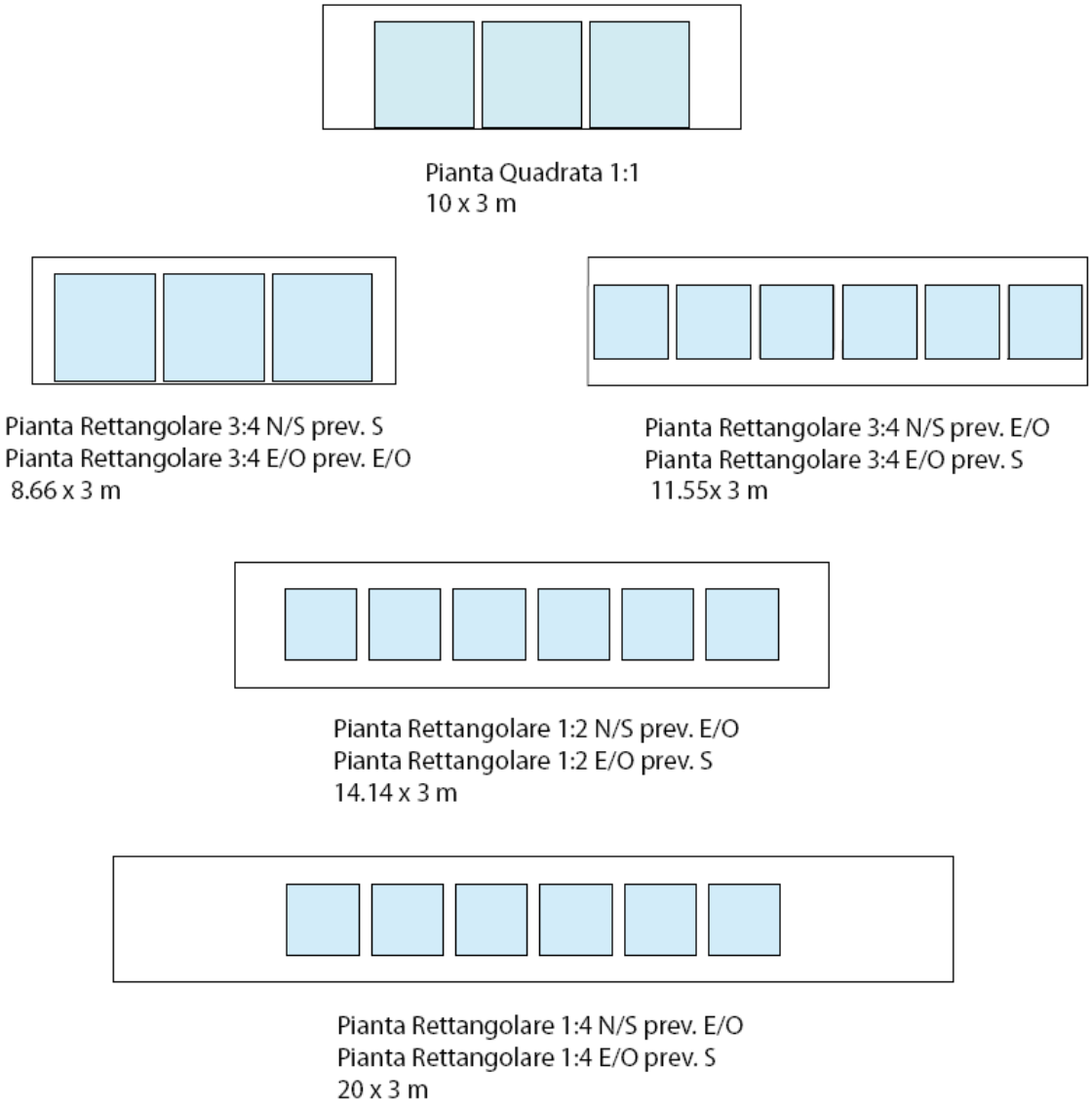
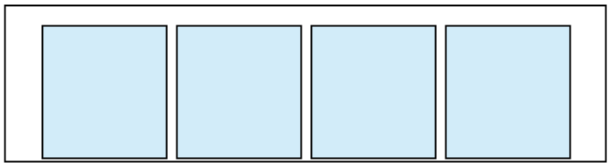

Pianta Quadrata 1:1
10 x 3 m
Pianta Rettangolare 3:4 N/S prev. S
Pianta Rettangolare 3:4 E/O prev. E/O
8.66 x 3 m
Pianta Rettangolare 3:4 N/S prev. E/O
Pianta Rettangolare 3:4 E/O prev. S
11.55x 3 m
Pianta Rettangolare 1:2 N/S prev. E/O
Pianta Rettangolare 1:2 E/O prev. S
14.14 x 3 m
Pianta Rettangolare 1:4 N/S prev. E/O
Pianta Rettangolare 1:4 E/O prev. S
20 x 3 m

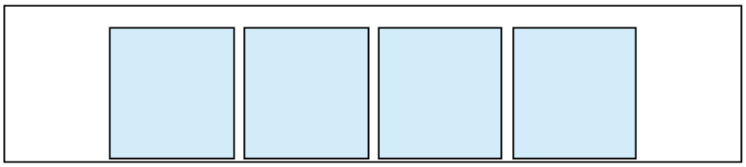
Figura 3.7 – Disposizione superficie vetrata 17.49 m^2

In Figura 3.8 troviamo le superfici vetrate con estensione pari a 23.32 m^2:

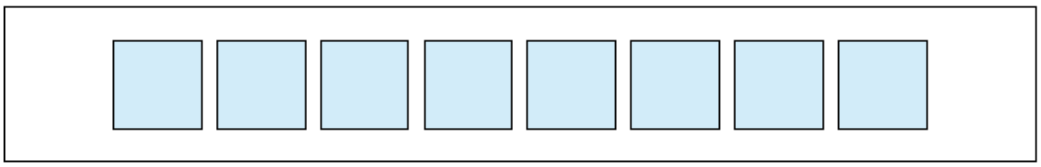
Pianta Quadrata 1:1
10 x 3 m



Pianta Rettangolare 3:4 N/S prev. E/O
Pianta Rettangolare 3:4 E/O prev. S
11.55x 3 m



Pianta Rettangolare 1:2 N/S prev. E/O
Pianta Rettangolare 1:2 E/O prev. S
14.14 x 3 m



Pianta Rettangolare 1:4 N/S prev. E/O
Pianta Rettangolare 1:4 E/O prev. S
20 x 3 m

Figura 3.8 – Disposizione superficie vetrata 23.32 m^2

Dalle figure riportate qui sopra possiamo osservare che sono stati utilizzati due diversi moduli di serramento: il primo modulo è la finestra, il secondo la portafinestra.
Sebbene dimensionalmente diverse nel singolo modulo, sia la finestra che la portafinestra hanno la medesima trasmittanza termica globale grazie all'accorgimento sulla trasmittanza termica del telaio, che dimensionalmente nei due casi ha un'incidenza diversa sulla superficie totale.

Le dimensioni delle finestre e delle portefinestre, con relative caratteristiche e prestazioni del telaio verranno descritte nel paragrafo seguente.

3.2.5.2 Strutture Finestrate: finestre e portefinestre

In questo paragrafo verranno descritte le caratteristiche costruttive di questi due sistemi finestrati e le prestazioni del telaio.
Le caratteristiche e le prestazioni dei vetri verranno trattate nel *Paragrafo 3.2.5.3*.

In Figura 3.9 e Figura 3.10 possiamo vedere come vengono visualizzate, nell'elaborazione al software *Window5*, la finestra e la portafinestra:

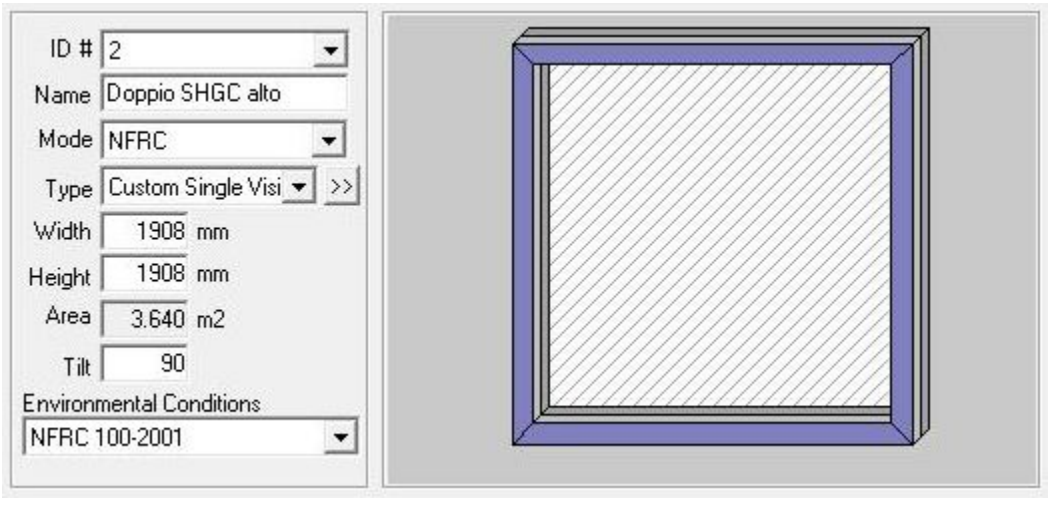


Figura 3.9 – Visualizzazione Grafica di una Finestra su *Window5*

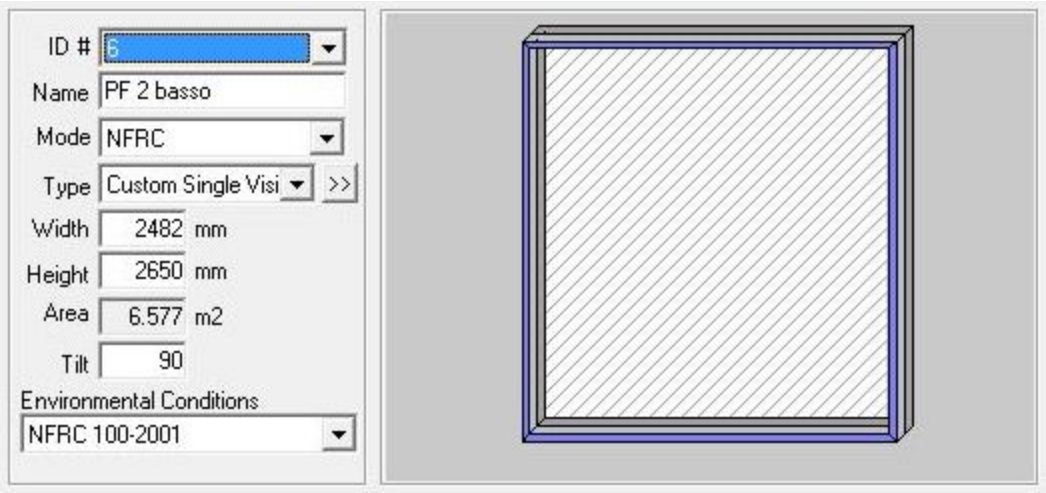


Figura 3.10 – Visualizzazione Grafica di una Portafinestra su *Window5*

Nelle figure, Figura 3.11 e Figura 3.12, vediamo in dettaglio le caratteristiche costruttive e le prestazioni del telaio della finestra e della portafinestra:

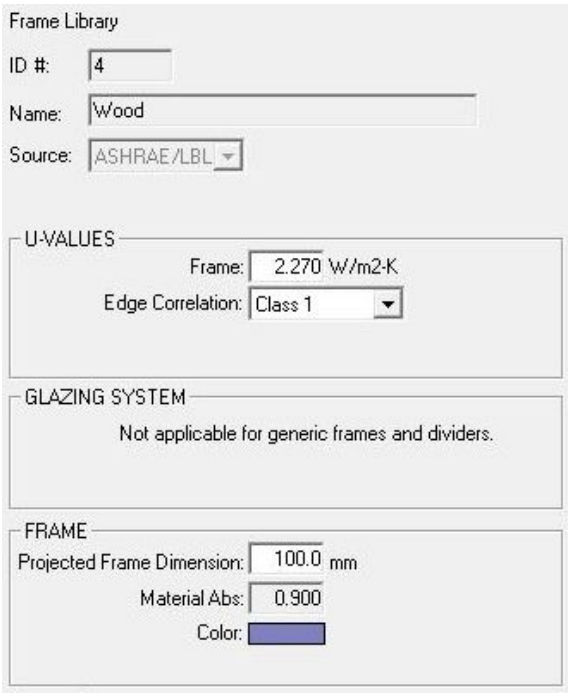


Figura 3.11 – Caratteristiche Telaio Finestra

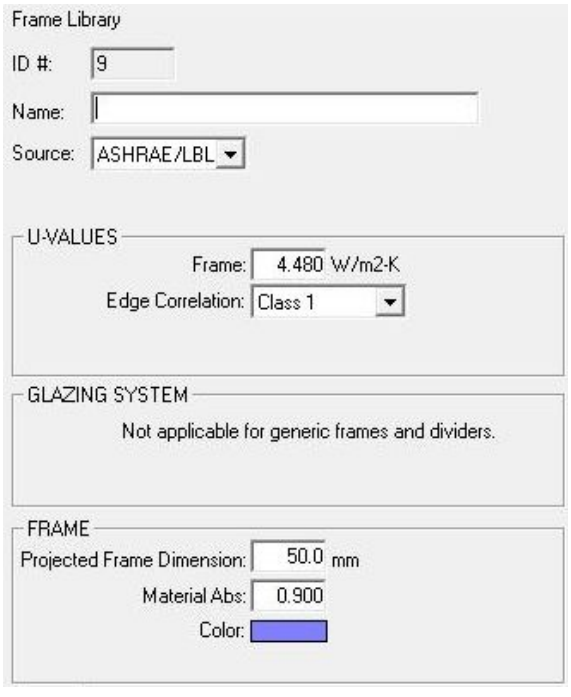


Figura 3.12 – Caratteristiche Telaio Poratfinestra

Per la finestra è stato scelto come materiale costruttivo del telaio il legno (*Wood)*, per la portafinestra è stato scelto un materiale meno performante (potrebbe essere un telaio metallico).
In Tabella 3.13 sono descritte in modo dettagliato le caratteristiche e le prestazioni del telaio di questi due sistemi:

Sistema	Dimensioni	Valore [mm]	Telaio	Caratteristiche	Valori
Finestra anta unica	Altezza	1908	Legno	Altezza dell'area proiettata sul piano della finestra	100 [mm]
	Larghezza	1908		U_f	2.270 [W/m^{2}K]
				Indice assorbimento	0.9
Portafinestra anta unica	Altezza	2650	Materiale poco performante (Alluminio)	Altezza dell'area proiettata sul piano della finestra	50 [mm]
	Larghezza	2482		U_f	4.48 [W/m^{2}K]
				Indice assorbimento	0.9

Tabella 3.13 – Caratteristiche e prestazioni del telaio dei sistemi finestrati

3.2.5.3 Caratteristiche e prestazioni delle superfici vetrate

Anche per la creazione delle superfici vetrate è stato utilizzato il software *Window5* che grazie alla connessione al database di Optics5, contenente più di 10000 tipologie differenti di vetro, ha permesso di creare le strutture vetrate con le caratteristiche desiderate.

Nella creazione dei sistemi vetrati è stata fatta attenzione ai parametri:

- *SHGC (Solar Heat Gain Coefficent),* il coefficiente di guadagno termico solare, è stato considerato "alto" (rispetto al nostro campo d'indagine, visto che il valore massimo è 1) per valori compresi tra 0.5 - 0.6, mentre è stato considerato "basso" per valori compresi tra 0.3 – 0.4.

- *U_g vetro,* trasmittanza termica del vetro, per i sistemi a doppio vetro compreso tra i valori di 1.000 e 1.200 W/m^{2}K, mentre per i sistemi a triplo vetro tle valore doveva essere compreso tra 0.600 e 1.000 W/m^{2}K.

Sia per i doppi vetri che per i tripli come gas presente nell'intercapedine della vetrocamera, in sostituzione all'aria, è stato scelto l'Argon che essendo un gas "inerte" ha la caratteristica di rallentare il moto convettivo interno all'intercapedine permettendo di diminuire la trasmissione del calore da una superficie all'altra, limitando così il fenomeno della dispersione. L'utilizzo dell'Argon ha benefici anche in termini di isolamento acustico.

I sistemi vetrati modellati sono quattro:

- Doppio Vetro, SHGC alto (Figura 3.14)
- Doppio Vetro, SHGC basso (Figura 3.15)
- Triplo Vetro, SHGC alto (Figura 3.16)
- Triplo Vetro, SHGC basso (Figura 3.17)

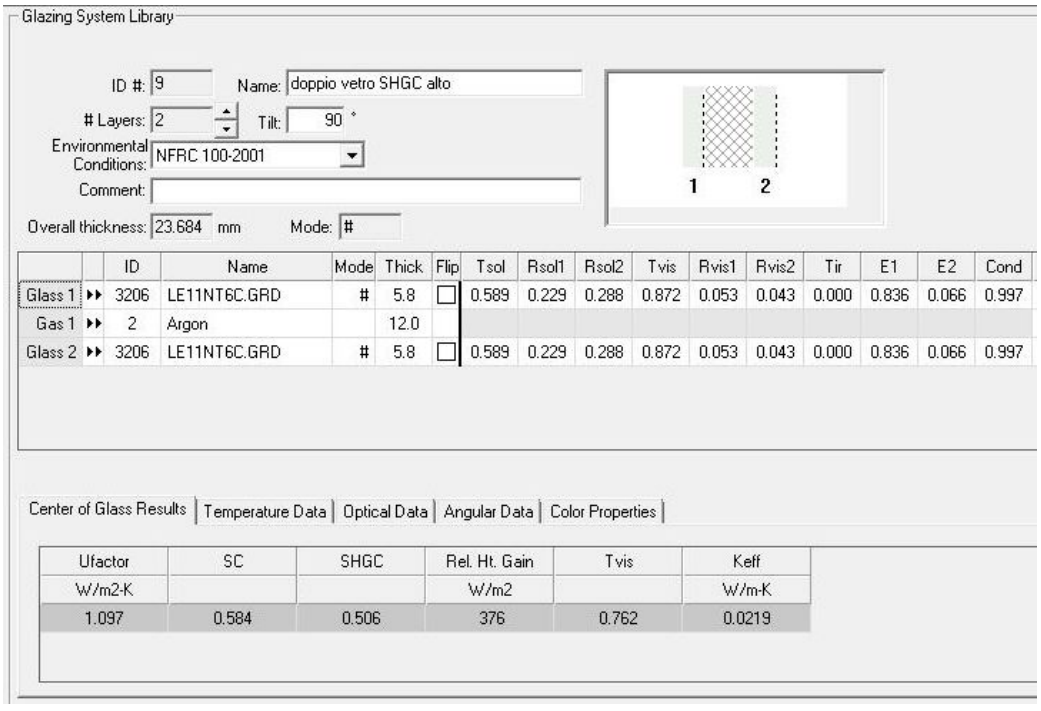

Glazing System Library
ID #: 9
Name: doppio vetro SHGC alto
Layers: 2
Tilt: 90 °
Environmental Conditions: NFRC 100-2001
Comment:
Overall thickness: 23.684 mm
Mode: #
1
2
ID Name Mode Thick Flip Tsol Rsol1 Rsol2 Tvis Rvis1 Rvis2 Tir E1 E2 Cond
Glass 1 3206 LE11NT6C.GRD # 5.8 0.589 0.229 0.288 0.872 0.053 0.043 0.000 0.836 0.066 0.997
Gas 1 2 Argon 12.0
Glass 2 3206 LE11NT6C.GRD # 5.8 0.589 0.229 0.288 0.872 0.053 0.043 0.000 0.836 0.066 0.997
Center of Glass Results
Temperature Data
Optical Data
Angular Data
Color Properties
Ufactor SC SHGC Rel. Ht. Gain Tvis Keff
W/m2-K W/m2 W/m-K
1.097 0.584 0.506 376 0.762 0.0219

Figura 3.14 – Doppio Vetro SHGC alto

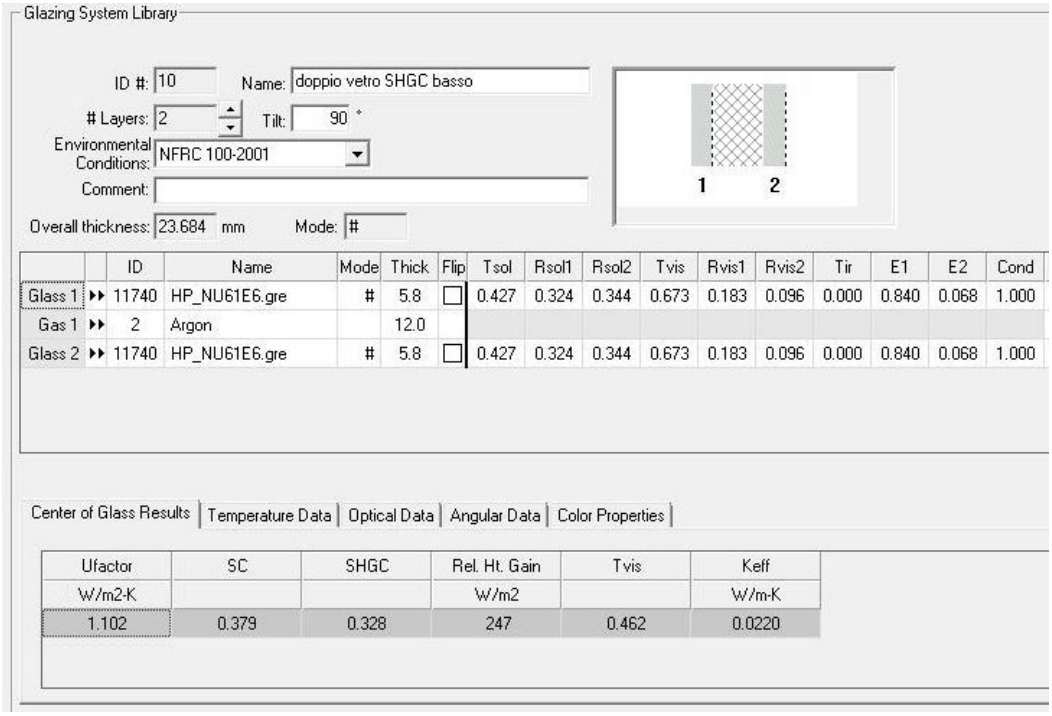

Glazing System Library
ID #: 10
Name: doppio vetro SHGC basso
Layers: 2
Tilt: 90 °
Environmental Conditions: NFRC 100-2001
Comment:
Overall thickness: 23.684 mm
Mode: #
1
2
ID | Name | Mode | Thick | Flip | Tsol | Rsol1 | Rsol2 | Tvis | Rvis1 | Rvis2 | Tir | E1 | E2 | Cond
Glass 1 | 11740 | HP_NU61E6.gre | # | 5.8 | 0.427 | 0.324 | 0.344 | 0.673 | 0.183 | 0.096 | 0.000 | 0.840 | 0.068 | 1.000
Gas 1 | 2 | Argon | | 12.0
Glass 2 | 11740 | HP_NU61E6.gre | # | 5.8 | 0.427 | 0.324 | 0.344 | 0.673 | 0.183 | 0.096 | 0.000 | 0.840 | 0.068 | 1.000
Center of Glass Results | Temperature Data | Optical Data | Angular Data | Color Properties
Ufactor | SC | SHGC | Rel. Ht. Gain | Tvis | Keff
W/m2-K | | | W/m2 | | W/m-K
1.102 | 0.379 | 0.328 | 247 | 0.462 | 0.0220

Figura 3.15 – Doppio Vetro SHGC basso

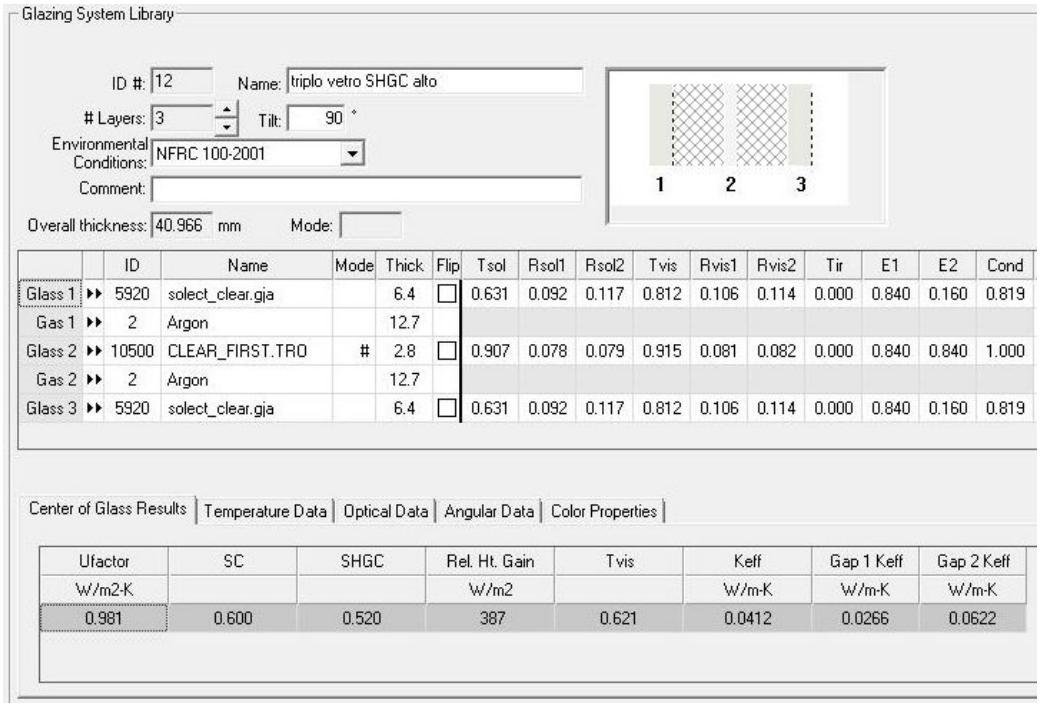

Glazing System Library
ID #: 12
Name: triplo vetro SHGC alto
Layers: 3
Tilt: 90 °
Environmental Conditions: NFRC 100-2001
Comment:
Overall thickness: 40.966 mm
Mode:
1
2
3
ID | Name | Mode | Thick | Flip | Tsol | Rsol1 | Rsol2 | Tvis | Rvis1 | Rvis2 | Tir | E1 | E2 | Cond
Glass 1 | 5920 | solect_clear.gia | | 6.4 | 0.631 | 0.092 | 0.117 | 0.812 | 0.106 | 0.114 | 0.000 | 0.840 | 0.160 | 0.819
Gas 1 | 2 | Argon | | 12.7
Glass 2 | 10500 | CLEAR_FIRST.TRO | # | 2.8 | 0.907 | 0.078 | 0.079 | 0.915 | 0.081 | 0.082 | 0.000 | 0.840 | 0.840 | 1.000
Gas 2 | 2 | Argon | | 12.7
Glass 3 | 5920 | solect_clear.gia | | 6.4 | 0.631 | 0.092 | 0.117 | 0.812 | 0.106 | 0.114 | 0.000 | 0.840 | 0.160 | 0.819
Center of Glass Results | Temperature Data | Optical Data | Angular Data | Color Properties
Ufactor | SC | SHGC | Rel. Ht. Gain | Tvis | Keff | Gap 1 Keff | Gap 2 Keff
W/m2-K | | | W/m2 | | W/m-K | W/m-K | W/m-K
0.981 | 0.600 | 0.520 | 387 | 0.621 | 0.0412 | 0.0266 | 0.0622

Figura 3.16 – Triplo Vetro SHGC alto

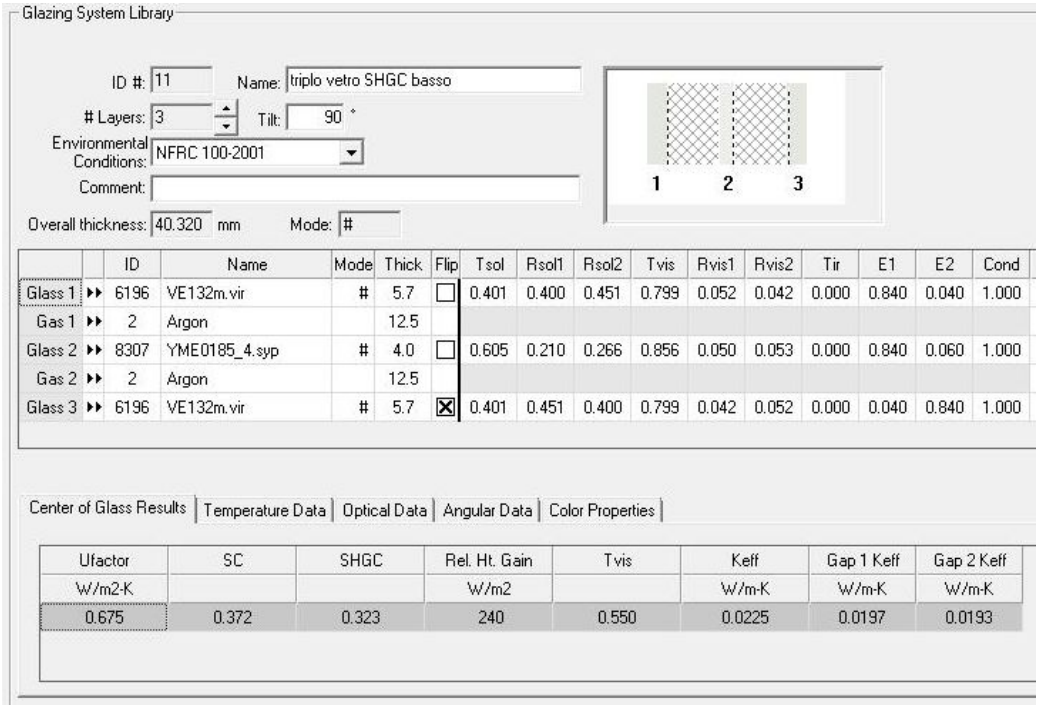

Glazing System Library
ID #: 11
Name: triplo vetro SHGC basso
Layers: 3
Tilt: 90
Environmental Conditions: NFRC 100-2001
Comment:
Overall thickness: 40.320 mm
Mode: #
1 2 3
ID Name Mode Thick Flip Tsol Rsol1 Rsol2 Tvis Rvis1 Rvis2 Tir E1 E2 Cond
Glass 1 6196 VE132m.vir # 5.7 0.401 0.400 0.451 0.799 0.052 0.042 0.000 0.840 0.040 1.000
Gas 1 2 Argon 12.5
Glass 2 8307 YME0185_4.syp # 4.0 0.605 0.210 0.266 0.856 0.050 0.053 0.000 0.840 0.060 1.000
Gas 2 2 Argon 12.5
Glass 3 6196 VE132m.vir # 5.7 0.401 0.451 0.400 0.799 0.042 0.052 0.000 0.040 0.840 1.000
Center of Glass Results
Temperature Data
Optical Data
Angular Data
Color Properties
Ufactor SC SHGC Rel. Ht. Gain Tvis Keff Gap 1 Keff Gap 2 Keff
W/m2-K W/m2 W/m-K W/m-K W/m-K
0.675 0.372 0.323 240 0.550 0.0225 0.0197 0.0193

Figura 3.17 – Triplo Vetro SHGC basso

In Tabella 3.18 sono elencate le caratteristiche dei vetri scelti per la nostra analisi:

Vetro	Spessore totale del vetro [mm]	Ug [W/m^{2}K]	SHGC
Doppio SHGC alto	23.680	1.097	0.506
Doppio SHGC basso	23.680	1.102	0.328
Triplo SHGC alto	40.966	0.981	0.520
Triplo SHGC basso	40.300	0.675	0.323

Tabella 3.18 – Caratteristiche e prestazioni dei vetri dei sistemi finestrati

Tali tipologie di vetri sono applicati sia alle finestre che alle portefinestre, in Tabella 3.19 sono elencate per ogni tipologia le prestazioni globali U_w tot (trasmittanza termica globale) SHGC tot (coefficiente di guadagno termico solare) e le prestazioni delle componenti telaio e superficie vetrata:

Tipologia	Vetro	U_f [W/m^{2}K]	U_g [W/m^{2}K]	SHGC vetro	U_w tot [W/m^{2}K]	SHGC tot
Finestra	Doppio SHGC alto	2.270	1.097	0.506	1.449	0.423
	Doppio SHGC basso	2.270	1.102	0.328	1.453	0.279
	Triplo SHGC alto	2.270	0.981	0.520	1.382	0.433
	Triplo SHGC basso	2.270	0.675	0.323	1.186	0.278
Portafinestra	Doppio SHGC alto	4.480	1.097	0.506	1.413	0.478
	Doppio SHGC basso	4.480	1.102	0.328	1.417	0.312
	Triplo SHGC alto	4.480	0.981	0.520	1.342	0.490
	Triplo SHGC basso	4.480	0.675	0.323	1.121	0.313

Tabella 3.19 – Prestazioni dei sistemi finestrati

3.3 Piano delle Simulazioni

Dato il gran numero dei casi che si possono ottenere con la variabilità dei fattori in esame è stato preparato un piano di simulazioni per poter lavorare su un gran numero di casi in modo strutturato e organico.

Come possiamo vedere in Tabella 3.20 non sono stati studiati tutti i casi perché la superficie vetrata era maggiore della superficie di parete da simulare.

			11.66		17.49		23.32	
	rapp. Lati	Orientaz.	14.61		21.92		29.22	
			Preval. SUD	Preval. E/O	Preval. SUD	Preval. E/O	Preval. SUD	Preval. E/O
pianta quadrata	1:1	-	ok	ok	ok	ok	ok	ok
pianta rettangolare	3:4	N/S	ok	ok	ok	ok	no	ok
		E/O	ok	ok	ok	ok	ok	no
pianta rettangolare	1:2	N/S	ok	ok	no	ok	no	ok
		E/O	ok	ok	ok	no	ok	no
pianta rettangolare	1:4	N/S	ok	ok	no	ok	no	ok
		E/O	ok	ok	ok	no	ok	no

Tabella 3.20 – Casi ammissibili

I casi ammissibili presenti in Tabella 3.20 sono riferiti, per estensione di superficie finestrata, ad ogni singola tipologia di vetro studiata.
Anche nel *Paragrafo 3.2.5.1 Estensione delle superfici vetrate* si può vedere che sono state rappresentate le configurazioni che sono previste nei casi del piano delle simulazioni.

3.3.1 Organizzazione File

Come punto di partenza è stato scelto di creare una cartella per ognuna delle tre località analizzate (Messina, Milano, Roma).
All'interno della cartella relativa alla località analizzata, sono state create tre sottocartelle indicanti i tre valori dello spessore di isolante presi in considerazione nelle simulazioni (5 cm, 10 cm, 15 cm).
Per ognuna di esse, al suo interno, sono state create altre tre sottocartelle indicanti il valore di superficie vetrata considerato in quel gruppo di simulazioni (11.66 m^2, 17.49 m^2, 23.32 m^2).
In ogni cartella relativa alla superficie vetrata sono state create tre sottocartelle indicanti l'orientazione preferenziale scelta per la simulazione (prevalente est, prevalente ovest, prevalente sud).
Infine, per ogni orientazione, sono state create quattro sottocartelle indicanti la tipologia di vetro installata nei sistemi finestrati (Doppio SHGC alto, Doppio SHGC basso, Triplo SHGC alto, Triplo SHGC basso), in ognuna di queste cartelle è contenuto il file **.idf* , che verrà simulato con il software *Energy Plus*.

In Figura 3.21 è schematizzato il sistema di organizzazione dei file nelle varie cartelle, come esempio è stato preso il caso: "Messina – isolante 5 cm – 11.66 mq. Superficie finestrata – prevalente est ".

Questa organizzazione dei file permette una più chiara lettura e trascrizione dei risultati ottenuti perché si segue l'ordine prestabilito.

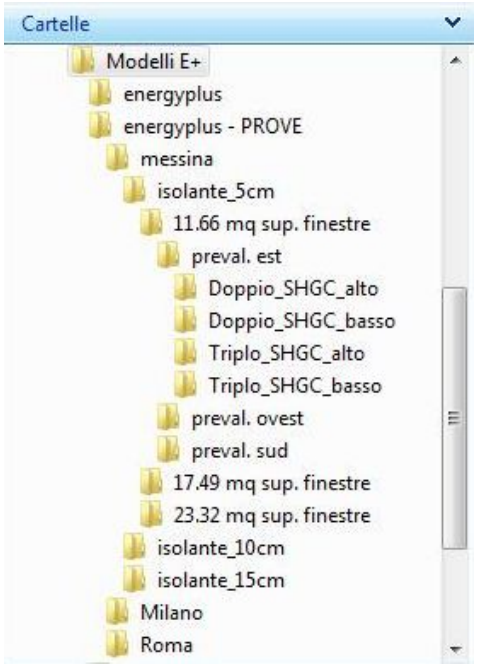


Figura 3.21 – Schema di organizzazione dei file

3.3.2 Esecuzione simulazione

Per le simulazioni si è utilizzato il software *Energy Plus* (descritto nel Capitolo 2). L'avvio della simulazione, del file **.idf,* avviene nella schermata *EP-Launch* azionando il comando "Simulate" (in Figura 3.22).

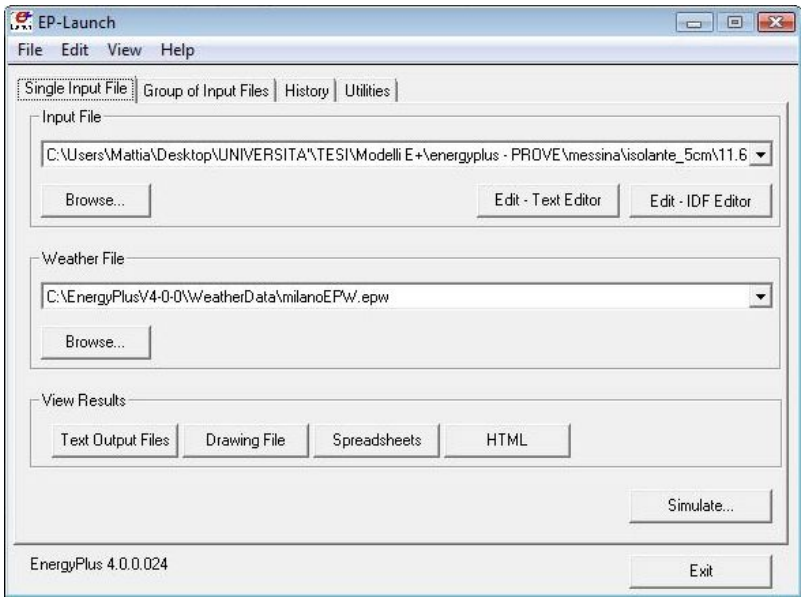


Figura 3.22 – Scermata EP-Launch, avvio simulazione

Avviata la simulazione si apre la finestra *Energy Plus Process,* illustrata in Figura 3.23, nella quale possiamo vedere a che punto (PERIOD) è la simulazione.

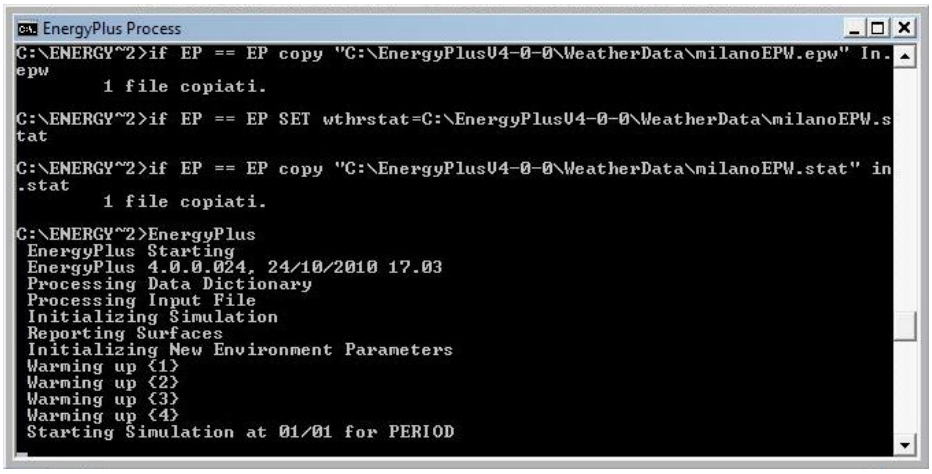


Figura 3.23 – Schermata EnergyPlus Process, simulazione

Una volta che la simulazione è terminata i file di output , generati da *EnergyPlus*, vengono salvati nella stessa cartella contenente il file **.idf* simulato. Nel nostro caso i file di output sono in formato HTML, i valori che ci interessano per la nostra analisi del fabbisogno estivo e invernale sono: *ZoneCoolingSummaryMonthly* e *ZoneHeatingSummaryMonthly* (Figura 3.24).

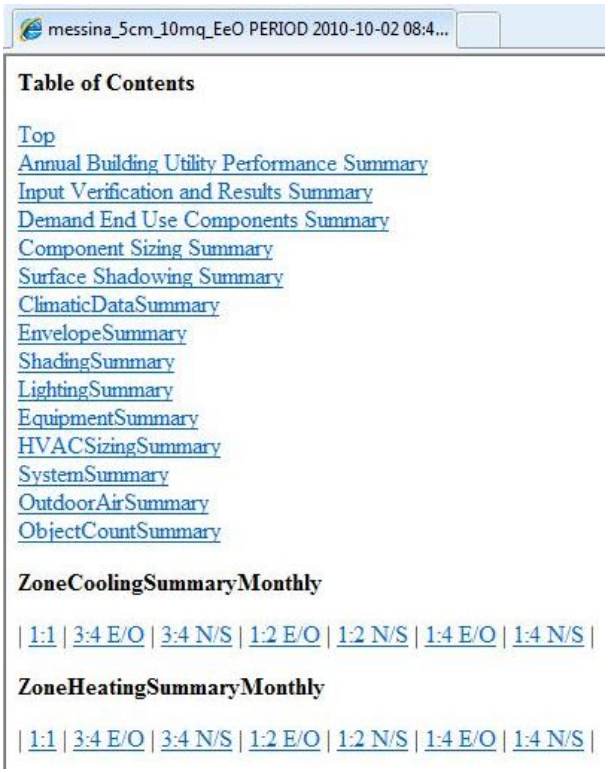
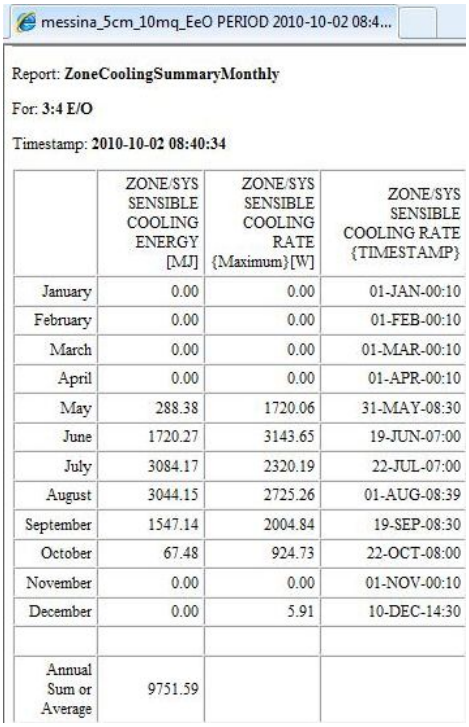


Figura 3.24 – Output HTML

I valori dei fabbisogni sono espressi mensilmente per tutte le zone simulate, ciò che andremo a considerare, ai fini dell'analisi statistica, sarà *Annual Sum or Average* che è il valore annuale del fabbisogno estivo o invrnale (Figura 3.25).



messina_5cm_10mq_EeO PERIOD 2010-10-02 08:4...

Report: **ZoneCoolingSummaryMonthly**

For: **3:4 E/O**

Timestamp: **2010-10-02 08:40:34**

	ZONE/SYS SENSIBLE COOLING ENERGY [MJ]	ZONE/SYS SENSIBLE COOLING RATE {Maximum} [W]	ZONE/SYS SENSIBLE COOLING RATE {TIMESTAMP}
January	0.00	0.00	01-JAN-00:10
February	0.00	0.00	01-FEB-00:10
March	0.00	0.00	01-MAR-00:10
April	0.00	0.00	01-APR-00:10
May	288.38	1720.06	31-MAY-08:30
June	1720.27	3143.65	19-JUN-07:00
July	3084.17	2320.19	22-JUL-07:00
August	3044.15	2725.26	01-AUG-08:39
September	1547.14	2004.84	19-SEP-08:30
October	67.48	924.73	22-OCT-08:00
November	0.00	0.00	01-NOV-00:10
December	0.00	5.91	10-DEC-14:30
Annual Sum or Average	9751.59		

Figura 3.25 – Esempio: Output HTML, Zona 3:4 E/O, ZoneCoolinSummaryMonthly

I risultati ottenuti dalle simulazioni sono stati inseriti in apposite tabelle al fine di poter eseguire l'analisi statistica al software.

Nel capitolo successivo, Capitolo 4, verrà presentata l'analisi statistica dei risultati: dopo l'analisi descrittiva in funzione della variabile considerata verrà effettuata la regressione lineare multivariata al software, sia per il fabbisogno estivo che per quello invernale.

CAPITOLO 4.

ANALISI STATISTICA DEI RISULTATI

4.1 Introduzione

In questo capitolo viene proposta l'analisi dei dati, del fabbisogno energetico estivo e invernale, ottenuti dalle simulazioni.

Sono stati fatti due tipi di analisi statistiche inferenziali con l'intento di ricostruire un modello lineare che mettesse in evidenza l'effetto di ciascuna delle variabili prese in esame sul fabbisogno:

- "Analisi Statistica 1": nel modello lineare sono state adottate alcune delle variabili indipendenti che sono state considerate per la definizione del piano delle simulazioni (descritte nel Capitolo3), entrano nel modello quelle variabili che hanno un legame di tipo lineare con variabile dipendente.
- "Analisi Statistica 2": nel modello lineare proposto in questa seconda analisi sono state considerate altre variabili che descrivono da un punto di vista quantitativo le caratteristiche termo fisiche sia dell'involucro edilizio sia le condizioni ambientali.

Nella prima parte del capitolo vengono riportate le statistiche descrittive dei due tipi di analisi svolte e vengono riportati i risultati ottenuti, aggregandoli sulla base dei fattori e delle variabili considerate nel modello statistico.

Nella seconda parte vengono riportate le analisi statistiche di regressione lineare, semplice e multipla, realizzate mediante l'utilizzo del software *SPSS Statistics 18.0*, che ci permettono di valutare il fabbisogno estivo e invernale sulla base dei modelli creati.

4.2 Analisi statistiche descrittive

Questa prima parte di analisi dei dati riporta le statistiche descrittive focalizzate sui fabbisogni invernali ed estivi.

Nei paragrafi seguenti verranno riportati i risultati ottenuti, delle due analisi statistiche svolte (Statistica 1 e Statistica 2), aggregati sulla base dei fattori considerati.

Per ogni variabile del fattore in esame verranno riportati il valore medio, il valore massimo, il valore minimo.

4.2.1 Analisi Statistica 1

Le variabili indipendenti considerate in questa prima analisi (località, spessore isolante, orientazione preferenziale delle superfici vetrate, forma della pianta dell'edificio, estensione della superficie vetrata, tipologia di vetro) sono i fattori scelti per definire il piano delle simulazioni.

4.2.1.1 Aggregazione per località

Le località oggetto della nostra analisi sono state caratterizzate tramite i rispettivi gradi giorno:

- Messina: 707 GG.
- Roma: 1415 GG.
- Milano: 2404 GG.

Per una determinata località il parametro "gradi giorno" (GG) rappresenta il fabbisogno termico di un'area geografica relativa alle normative vigenti sul riscaldamento - raffrescamento delle abitazioni.

Il valore numerico rappresenta la somma delle differenze giornaliere (solo positive o solo negative) tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20 °C, e la temperatura media giornaliera esterna.

La somma delle differenze giornaliere, tra le due temperature, viene eseguita per tutti i giorni del periodo annuale convenzionale.

Un valore basso indica un breve periodo di riscaldamento/raffreddamento e temperature medie giornaliere prossime alla temperatura fissata per l'ambiente.

I grafici seguenti riportano i fabbisogni invernali (Grafico 4.2) e i fabbisogni estivi (Grafico 4.3) aggregati per ciascuna delle tre località considerate nelle

simulazioni, nella tabella sottostante (Tabella 4.1) vengono riportati: la deviazione standard, i valori medi, massimi e minimi per le località.

		Fabbisogni Invernali				Fabbisogni Estivi			
Località	GG	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]
Messina	707	4,290.01	2,456.29	10,150.73	344.88	12,905.57	4,029.10	23,950.09	5,085.42
Roma	1,415	10,295.79	4,243.00	20,035.15	1,829.87	10,511.02	3,929.18	21,450.45	3,765.68
Milano	2,404	21,083.99	6,174.78	32,971.27	9,897.69	7,618.10	3,195.57	17,950.39	2,540.07

Tabella 4.1 – Fabbisogni Invernali ed Estivi aggregati per Località (GG)

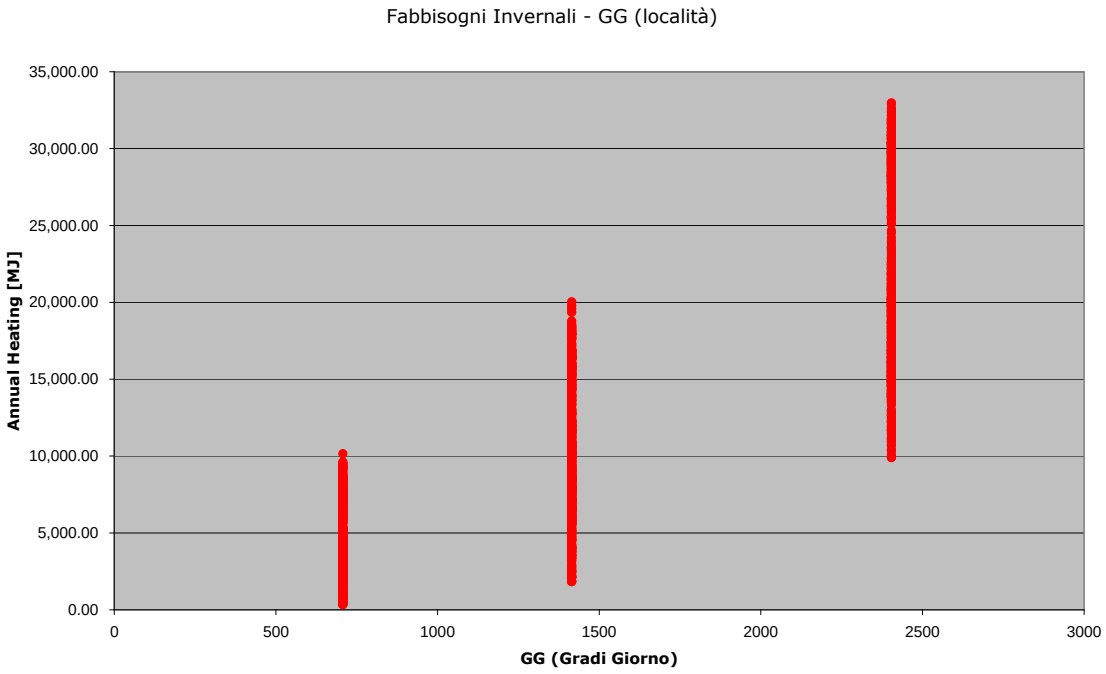


Grafico 4.2 – Fabbisogni invernali aggregati per località (GG)

Dal grafico dei fabbisogni invernali si conferma che il fabbisogno cresce linearmente con l'aumentare dei gradi giorno, ciò significa che nella città di Milano (2404 GG) il periodo di riscaldamento è maggiore rispetto a Roma (1415 GG) e Messina (707 GG).

Si osserva inoltre che i valori relativi alla località di Messina sono più concentrati, vicino al valore medio, rispetto alle altre due località, questo è confermato dal valore della deviazione standard che è più basso.

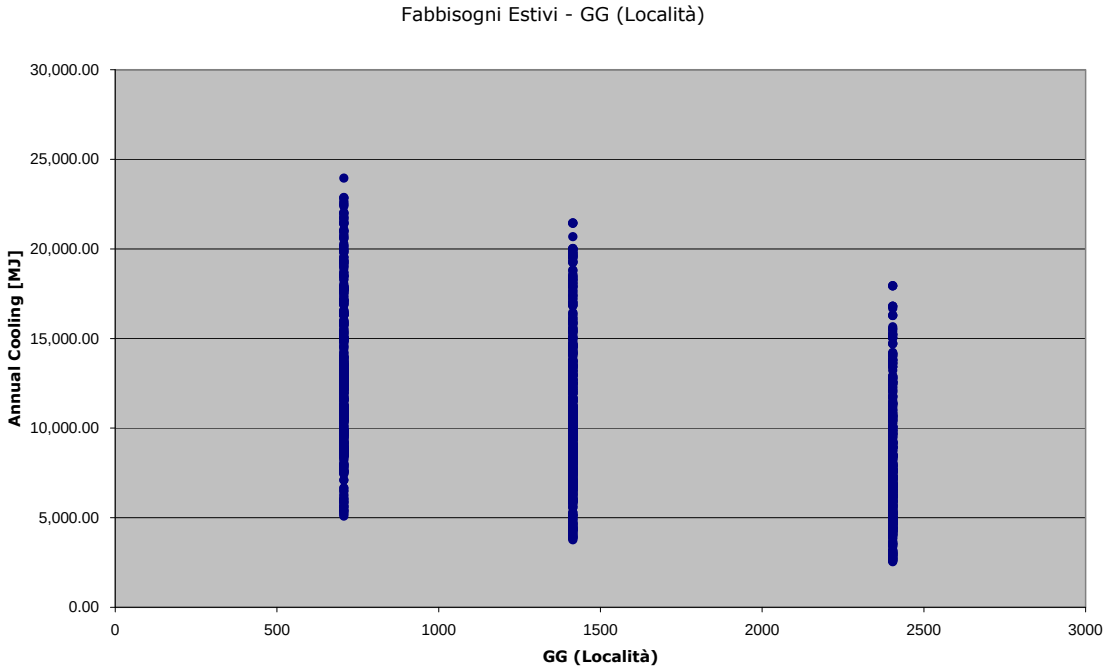


Grafico 4.3 – Fabbisogni estivi aggregati per località (GG)

Dal grafico dei fabbisogni estivi è confermato che il fabbisogno diminuisce linearmente con l'aumentare del valore dei gradi giorno della località, significa che il periodo di raffrescamento a Milano (2404 GG) è minore rispetto a Roma (1415 GG) e Messina (707).

Inoltre si osserva che i valori della località Milano sono più concentrati vicino al valore medio, rispetto alle altre due località, come confermato dal valore minore della deviazione standard.

4.2.1.2 Aggregazione per spessore dell'isolante

In questo paragrafo verrà illustrata la dipendenza del fabbisogno invernale ed estivo dallo spessore dell'isolante, mantenendo costante lo spessore del laterizio pari a 20 cm.

Gli spessori di isolante trattati nella nostra analisi sono tre:

- 5 cm isolante
- 10 cm isolante
- 15 cm isolante

Nella seguente tabella (Tabella 4.4) sono riportati: la deviazione standard, i valori medi, massimi e minimi dei fabbisogni, aggregati rispetto ai tre spessori studiati.

	Fabbisogni Invernali				Fabbisogni Estivi			
Spess isolante [cm]	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]
5	17,017.71	9,232.15	32,971.27	2,830.25	9,939.92	4,071.28	22,500.80	2,678.30
10	10,820.41	6,849.86	23,850.59	861.64	10,448.89	4,525.57	23,950.09	2,540.07
15	7,831.67	5,577.63	19,097.70	344.88	10,645.89	4,313.50	22,575.05	2,562.12

Tabella 4.4 – Fabbisogni Invernali ed Estivi aggregati per Spessore isolante

I grafici seguenti illustrano l'andamento del fabbisogno invernale (Grafico 4.5) e l'andamento del fabbisogno estivo (Grafico 4.6) al variare dello spessore di isolante applicato alla parete dell'involucro edilizio.

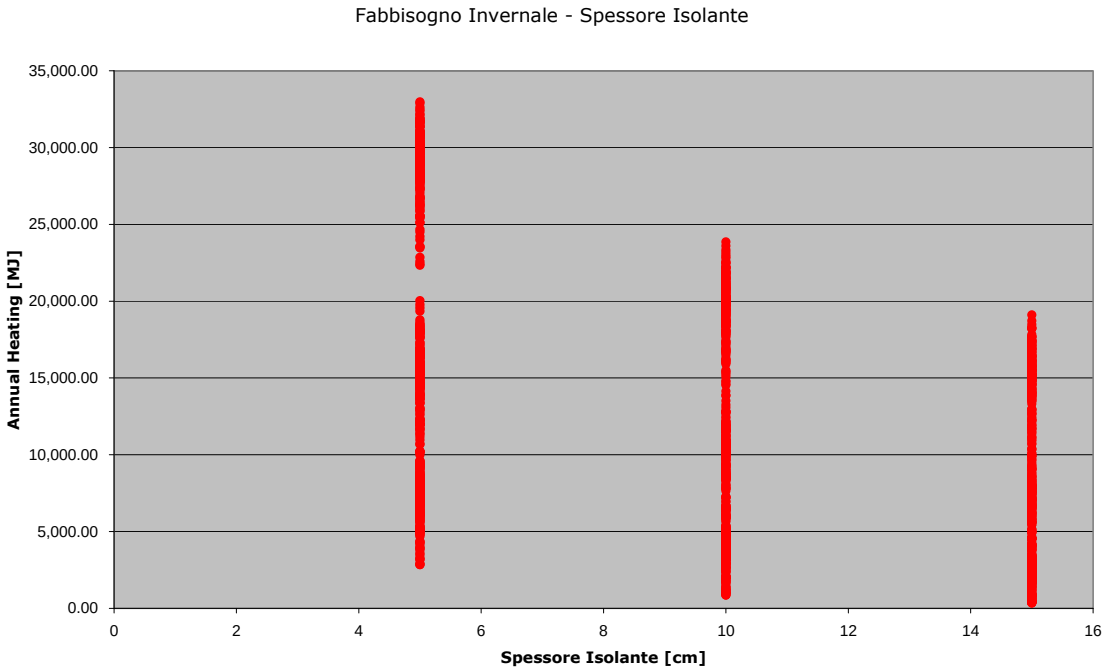


Grafico 4.5 – Fabbisogni invernali aggregati per spessore dell'isolante

Dal grafico dei fabbisogni invernali è confermato che minore è lo spessore di isolante maggiore è l'apporto energetico necessario per riscaldare l'ambiente.
Questo andamento è confermato anche in Tabella 4.4, si osserva inoltre che il fabbisogno invernale con spessore dell'isolante pari a 5 cm si scosta di molto, circa del 57%, rispetto al valore riferito allo spessore pari a 10 cm mentre la differenza esistente tra i fabbisogni relativi ad uno spessore di 10 cm e 15 cm è minore, circa del 38 %.

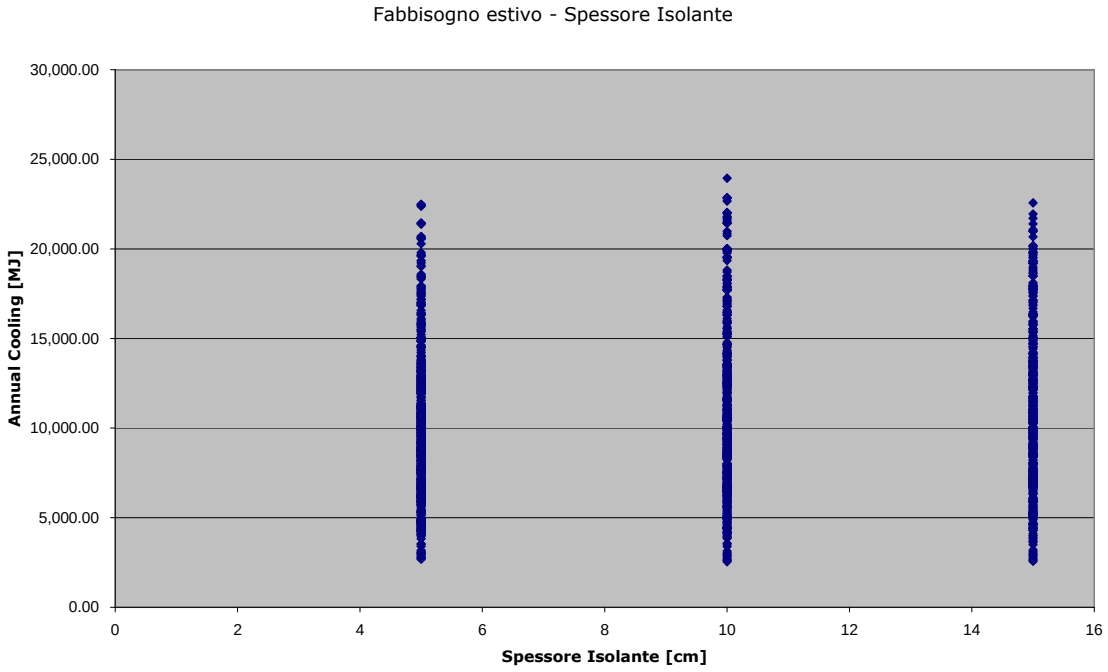


Grafico 3.6 - – Fabbisogni estivi aggregati per spessore dell'isolante

Nel grafico dei fabbisogni estivi è confermato l'andamento descritto in Tabella 4.4: lo spessore dell'isolante non influenza significativamente il fabbisogno estivo per quanto riguarda il raffrescamento dell'ambiente, infatti i valori relativi ai tre spessori risultano avere andamento quasi costante.

4.2.1.3 Aggregazione per tipologia di edificio

In questo paragrafo si prende in considerazione l'influenza della tipologia di edificio nel determinare i valori dei fabbisogni invernali ed estivi.

Le tipologie di edificio analizzate sono sette (di seguito vengono elencati anche i valori numerici assegnati per l'analisi statistica):

- Pianta quadrata 1:1 (valore 110)
- Pianta rettangolare 3:4 E/O (valore 120)
- Pianta rettangolare 3:4 N/S (valore 130)
- Pianta rettangolare 1:2 E/O (valore 140)
- Pianta rettangolare 1:2 N/S (valore 150)
- Pianta rettangolare 1:4 E/O (valore 160)
- Pianta rettangolare 1:4 N/S (valore 170)

I valori della deviazione standard, quelli medi, massimi e minimi dei fabbisogni per ogni tipologia sono elencati nella seguente tabella riassuntiva (Tabella 4.7).

	Fabbisogni Invernali				Fabbisogni Estivi			
Tipologia Edificio	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]
1:1	11,247.42	8,060.82	30,746.05	344.88	11,351.56	4,404.41	23,950.09	4,078.85
3:4 N/S	11,675.02	8,116.28	30,866.47	384.33	11,010.58	4,163.13	22,854.21	4,104.62
3:4 E/O	11,749.34	8,250.57	31,678.19	345.51	8,973.67	4,055.91	21,755.54	2,829.56
1:2 N/S	12,230.49	8,245.07	31,383.62	606.67	11,086.87	4,162.18	22,870.31	4,266.27
1:2 E/O	11,227.55	8,292.70	32,134.58	351.28	9,033.13	4,287.94	21,952.05	2,648.20
1:4 N/S	13,108.50	8,609.57	32,971.27	714.78	11,008.45	4,091.22	22,660.30	4,346.65
1:4 E/O	12,066.73	8,706.68	32,483.01	453.68	8,731.56	4,087.92	21,473.53	2,540.07

Tabella 4.7 – Fabbisogni Invernali ed Estivi aggregati per Tipologia di edificio

Da un'analisi preliminare dei valori riassunti in Tabella 4.7 possiamo concludere che la tipologia di edificio, cioè il rapporto tra i lati dell'edificio e la direzione prevalente in cui si sviluppa, non influenza in modo significativo i fabbisogni invernali mentre quelli estivi sono influenzati dall'orientazione in cui si sviluppano sviluppa l'edificio.

A seguire vengono proposti e commentati i grafici riferiti ai fabbisogni invernali (Grafico 4.8) e ai fabbisogni estivi (Grafico 4.9).

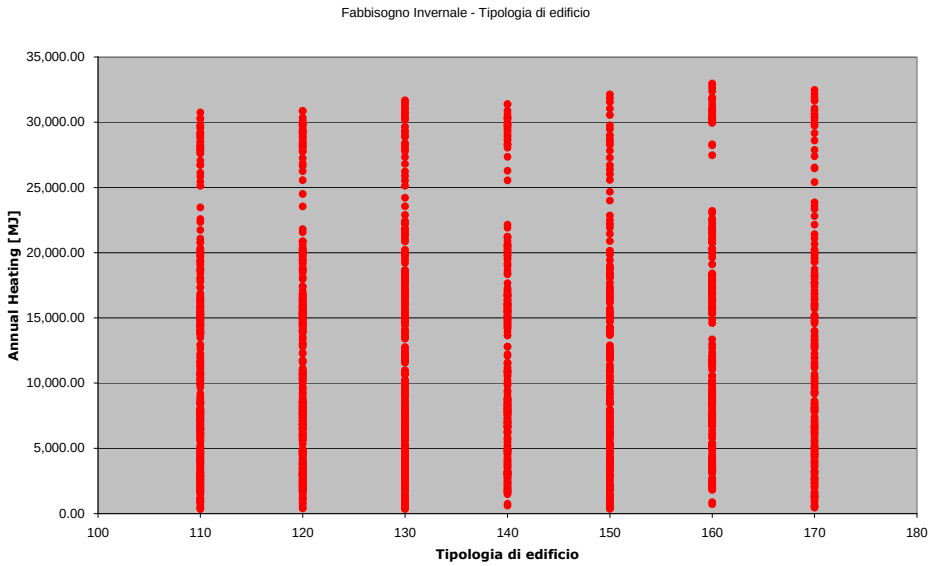


Grafico 4.8 – Fabbisogni invernali raggruppati per tipologia di edificio

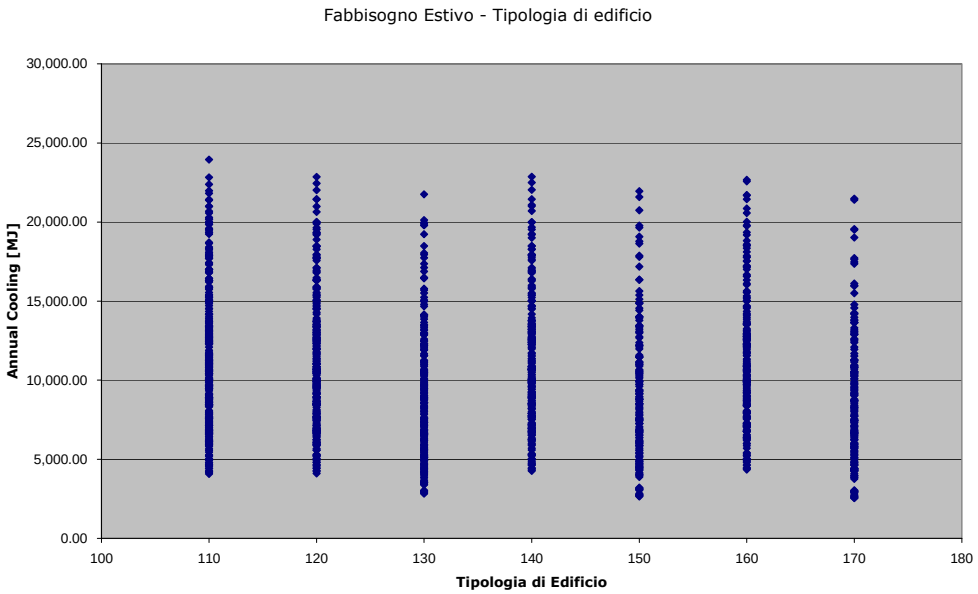


Grafico 4.9 – Fabbisogni estivi raggruppati per tipologia di edificio

Osservando i grafici si capisce che la tipologia di edificio influenza in modo minimo sia il fabbisogno invernale che quello estivo. I valori per tutte le tipologie di edificio hanno andamento pressoché costante.
Nel caso del fabbisogno estivo i valori sono più concentrati vicino al valore medio, come si può vedere dai valori della deviazione standard in tabella.
Inoltre in regime estivo si osserva che i fabbisogni, a parità di rapporto tra i lati della pianta dell'edificio, sono minori nell'orientazione E/O rispetto all'orientazione N/S.

4.2.1.4 Aggregazione per estensione della superficie vetrata

L'altra variabile rispetto alla quale si vuole studiare la dipendenza dei fabbisogni invernali ed estivi è l'estensione della superficie vetrata.
Le estensioni di superficie vetrata oggetto delle simulazioni sono tre:

- 11.66 m^2
- 17.49 m^2
- 23.32 m^2

Una prima analisi dei risultati ottenuti, aggregati a questa variabile, può essere fatta commentando i dati della tabella seguente che contiene i valori medi, massimi e minimi riferiti ai tre casi di estensione della superficie vetrata.

	Fabbisogni Invernali				Fabbisogni Estivi			
Superficie Vetrata [m^2]	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]
11.66	12,366.60	8,280.62	32,880.64	606.67	7,892.36	2,830.15	14,420.63	2,540.07
17.49	11,732.82	8,305.13	32,633.13	381.03	10,893.04	3,822.94	20,190.29	3,541.70
23.32	11,252.14	8,323.38	32,971.27	344.88	13,951.66	4,282.56	23,950.09	5,742.22

Tabella 4.10 – Fabbisogni Invernali ed Estivi aggregati per Estensione della superficie vetrata

Dai valori presenti in Tabella 4.10 possiamo dire che l'estensione della superficie vetrata incide maggiormente sui fabbisogni estivi che aumentano all'aumentare della superficie vetrata, i fabbisogni invernali invece rimangono su valori vicini tra loro.

A questi livelli di analisi una relazione di proporzionalità diretta (o inversa) tra il fabbisogno invernale e la superficie finestrata non è individuabile, probabilmente (e le successive analisi ce lo confermeranno) è bene tener conto delle grandezze fisiche che interessano le finestre (trasmittanza termica e fattore solare) e delle loro possibili interazioni.

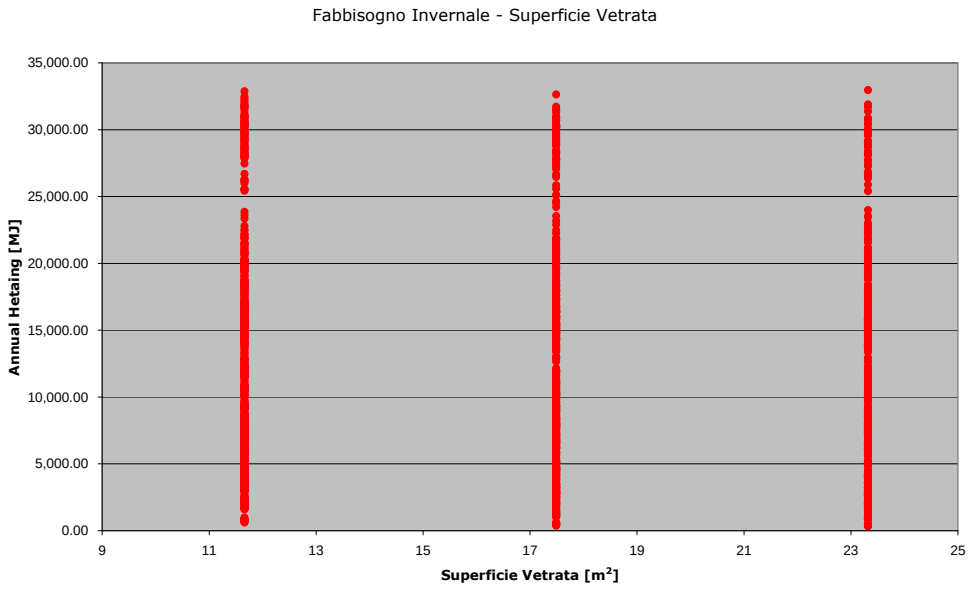


Grafico 3.11- Fabbisogno invernale raggruppato per estensione della superficie vetrata

Nel Grafico 4.11 relativo ai fabbisogni invernali è confermata l'osservazione che è stata fatta commentando la Tabella 4.10, i valori dei fabbisogni invernali non hanno variazioni considerevoli in funzione dell'estensione della superficie vetrata cioè a questo livello di analisi il fabbisogno invernale non dipende direttamente dall'estensione della superficie vetrata, probabilmente tenendo in considerazione altri fattori che caratterizzano maggiormente la superficie vetrata è possibile registrare un andamento diverso.

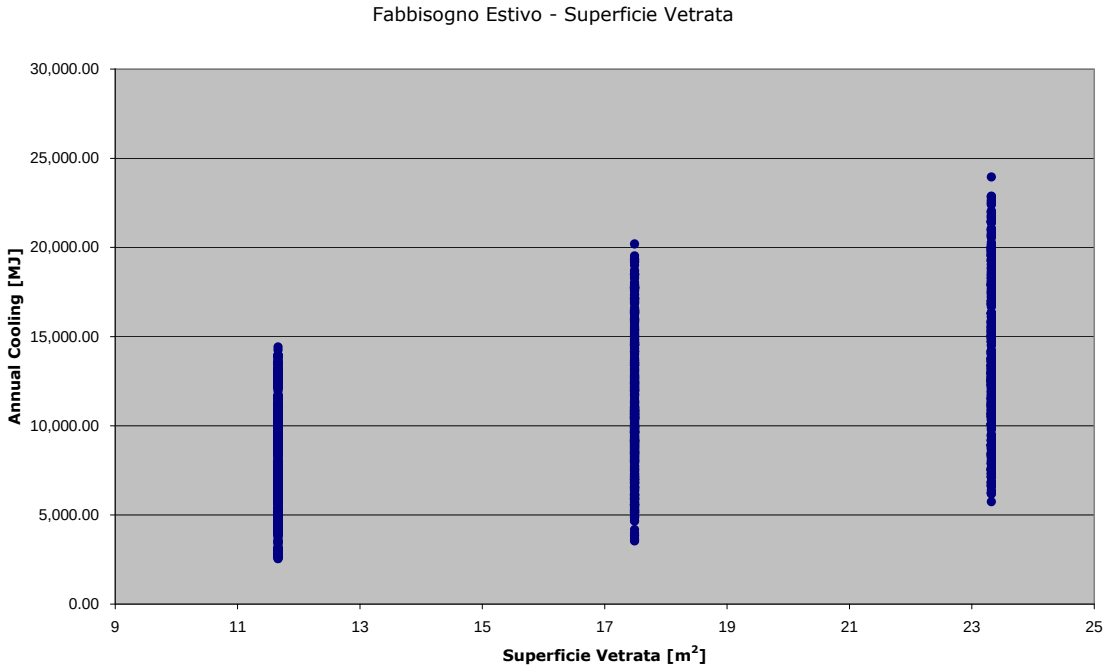


Grafico 4.12 - Fabbisogno estivo raggruppato per estensione della superficie vetrata

Per quanto riguarda il fabbisogno estivo si può dire, osservando il Grafico 4.12, che esso dipende linearmente dall'estensione della superficie vetrata.
Un aumento della superficie vetrata comporta un aumento di energia utilizzata per raffrescare l'ambiente.

4.2.1.5 Aggregazione per orientazione preferenziale della superficie vetrata

In questo paragrafo verranno illustrati e commentati i risultati ottenuti dall'aggregazione dei valori dei fabbisogni a seconda dell'orientazione in cui è stata distribuita la superficie vetrata.

Le orientazioni considerate in questo lavoro sono tre (tra parentesi sono espressi i valori numerici attribuiti alle variabili per poter eseguire l'analisi statistica):

- SUD (valore 11)
- OVEST (valore 22)
- EST (valore 33)

	Fabbisogni Invernali				Fabbisogni Estivi			
Orientazione Preferenziale	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]
SUD	9,888.25	8,014.17	30,621.32	344.88	9,932.57	3,966.70	21,952.05	3,971.93
OVEST	12,824.72	8,299.98	32,880.64	1,627.76	10,815.79	4,137.86	22,870.31	4,236.85
EST	12,956.82	8,252.34	32,971.27	1,421.23	10,286.34	4,761.91	23,950.09	2,540.07

Tabella 4.13 – Fabbisogni Invernali ed Estivi aggregati per orientazione della superficie vetrata

Grazie ai valori contenuti in Tabella 4.13 è possibile condurre una prima analisi basata sui valori della deviazione standard, medi, massimi e minimi del fabbisogno invernale ed estivo, aggregato per orientazione preferenziale della superficie vetrata.

Si può osservare che sia il fabbisogno invernale che quello estivo, richiesto con orientazione della superficie vetrata prevalentemente a sud è inferiore rispetto quello richiesto considerando come orientazioni prevalenti est e ovest.

Un'analisi più approfondita dei risultati si ottiene analizzando i grafici relativi ai fabbisogni invernali (Grafico 4.14) e ai fabbisogni estivi (Grafico 4.15).

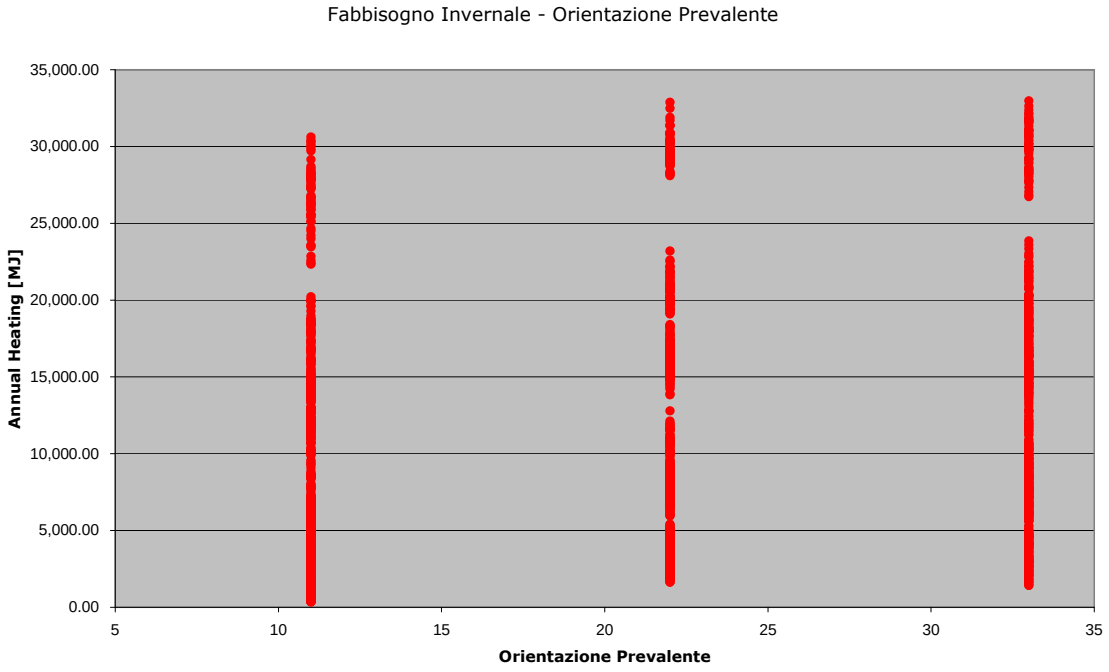


Grafico 4.14

Da questo grafico si può vedere che orientando la superficie vetrata prevalentemente verso sud la richiesta energetica per il riscaldamento dell'ambiente è inferiore ai casi ovest ed est in cui la richiesta energetica è pressoché costante.

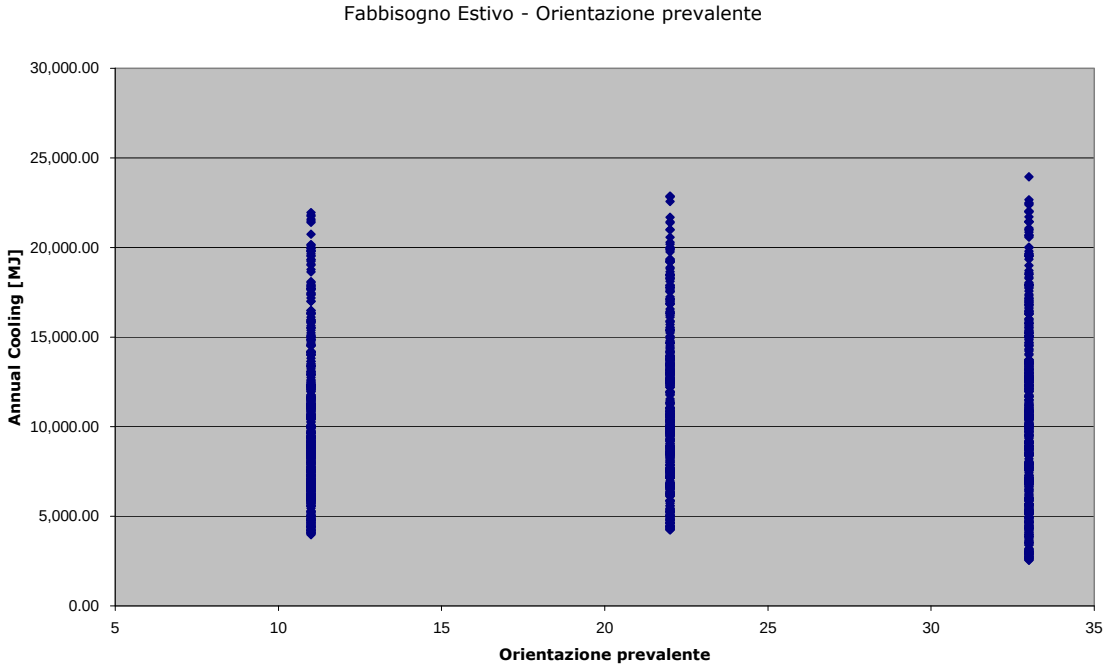


Grafico 4.15

Per quanto riguarda i fabbisogni estivi, aggregati per orientazione prevalente, osserviamo che l'andamento è simile ai fabbisogni invernali cioè minor richiesta energetica per il raffrescamento nel caso di superficie vetrata a sud e richiesta energetica con andamento costante per le orientazioni ovest ed est.
La differenza tra il fabbisogno estivo quello invernale è che nel caso dell'estivo i valori relativi alle tre orientazioni hanno andamento più costante.

4.2.1.5 Aggregazione per tipologia di vetro

In questo paragrafo viene analizzata la dipendenza dei fabbisogni invernali ed estivi dalla tipologia di vetro installata.
Sono stati studiati due tipologie di doppio vetro e due tipologie di triplo vetro, una con SGHC (coefficiente di guadagno termico solare) alto e una con SHGC basso per un totale di quattro tipologie (vengono elencati anche i valori assegnati nell'analisi statistica alle quattro variabili):

- Doppio Vetro SHGC Alto (valore 101)
- Doppio Vetro SHGC Basso (valore 102)
- Triplo Vetro SHGC Alto (valore 103)
- Triplo Vetro SHGC Basso (valore 104)

	Fabbisogni Invernali				Fabbisogni Estivi			
Tipo Vetro	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]	Media [MJ]	Dev. Std.	Max [MJ]	Min [MJ]
Doppio SHGC Alto	11,404.08	8,323.20	31,931.88	409.43	12,130.85	4,487.79	22,870.31	2,873.58
Doppio SHGC Basso	12,773.91	8,453.33	32,971.27	948.91	8,860.39	3,101.32	16,345.33	2,603.98
Triplo SHGC Alto	10,975.33	8,201.02	31,647.73	344.88	12,709.19	4,490.75	23,950.09	2,947.12
Triplo SHGC Basso	12,406.40	8,146.96	31,796.97	891.02	7,679.16	2,560.79	13,760.53	2,540.07

Tabella 4.16 – Fabbisogni Invernali ed Estivi aggregati per tipologia di vetro

Dai dati contenuti in Tabella 4.16 emerge che per quanto riguarda i fabbisogni invernali, in questa prima analisi, si può dire che il tipo di veto non incide in modo significativo, ma si può fare qualche osservazione: il doppio vetro con SHGC basso e il triplo vetro con SHGC basso sono comparabili, questo significa

che le dispersioni e i guadagni solari si bilanciano. Viceversa negli altri 2 casi si può dire che il triplo vetro ad alto guadagno solare, in regime invernale, è in media più performante del doppio vetro ad alto guadagno solare.
Nel caso del fabbisogno estivo invece si vede che vetri con guadagno solare (SHGC) basso sono preferibili a quelli con guadagno solare (SHGC) alto perché comportano minor richiesta energetica per il raffrescamento dell'ambiente perché sono minori i carichi dovuti agli apporti energetici della radiazione solare.

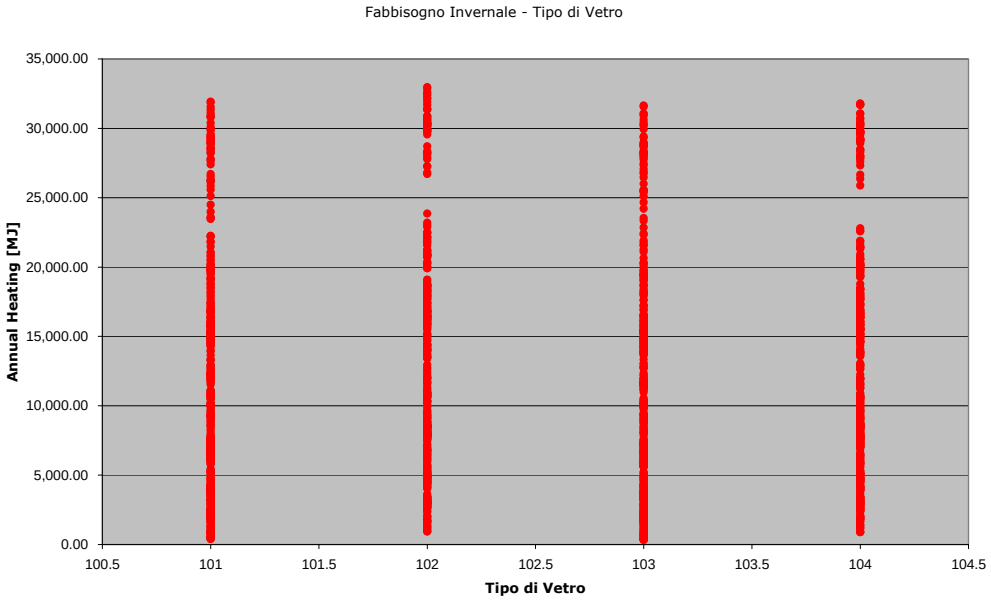


Grafico 4.17 – Fabbisogni invernali aggregati per tipologia di vetro

Dal grafico dei fabbisogni invernali, confrontando gli andamenti in funzione delle diverse tipologie di vetro, emerge che il doppio vetro con SHGC basso e il triplo vetro con SHGC basso sono comparabili, questo sta ad indicare che le dispersioni di calore e i guadagni solari si bilanciano. Inoltre si può vedere che il triplo vetro ad alto guadagno solare è in media più performante del doppio vetro ad alto guadagno solare.

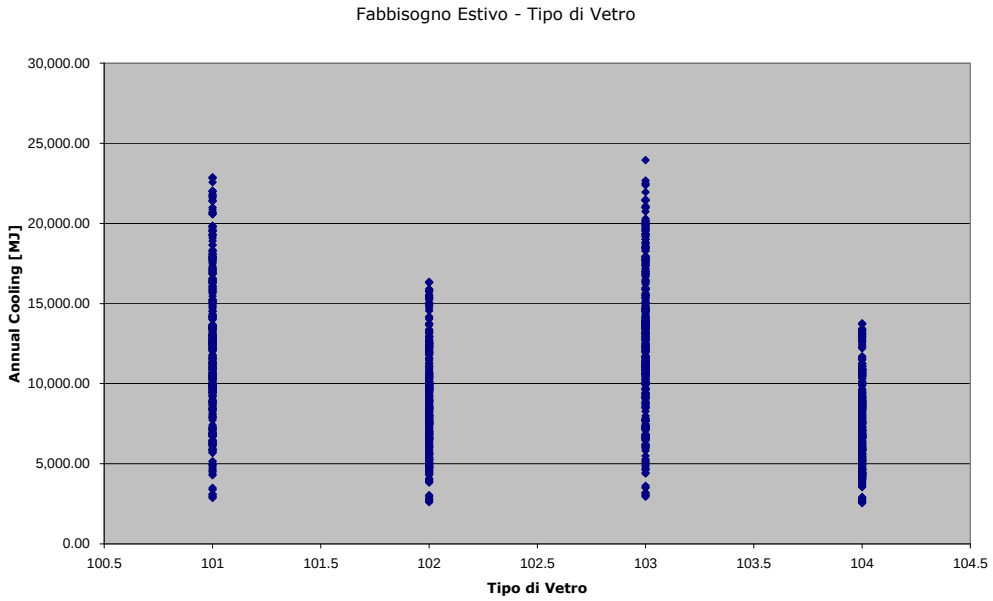


Grafico 4.18 - Fabbisogni estivi aggregati per tipologia di vetro

Nel grafico del fabbisogno estivo si può vedere che, a differenza del fabbisogno invernale, il fabbisogno estivo è maggiormente influenzato dal tipo di vetro installato.

Richieste minori di energia per il raffrescamento dell'ambiente sono associati a vetri aventi SHGC basso.

4.2.2 Analisi Statistica 2

Si è ripetuta l'analisi statistica con altre variabili di tipo numerico quantitativo che descrivono più dettagliatamente sia le caratteristiche termo fisiche dell'involucro edilizio che delle condizioni ambientali.

Le variabili inserite in questa seconda analisi sono:

- Resistenza termica (R) dell'involucro opaco [m^2 K / W],
- Capacità termica (C) dell'involucro opaco [J / m^2 K],
- Fattore solare del vetro ($SHGC$),
- Trasmittanza termica (U_g) del vetro [W / m^2 K],
- Radiazione incidente alle varie orientazioni [MJ/m^2],
- Estensione delle superfici opache e trasparenti [m^2].

Date le nuove variabili è stato possibile aggregare i fabbisogni estivi e quelli invernali rispetto a questi fattori:

- *Dispersione delle superfici opache* [Wh]
- *Reciproco della costante di tempo* dell'involucro [1/s]
- *Trasmittanza termica U_g e Fattore solare SHGC del vetro*
- *Dispersione delle superfici vetrate* [Wh]
- *Radiazione entrante nella zona studiata* [MJ]
- *Radiazione incidente sulle superfici opache* [MJ]
- *Rapporto superficie vetrata su superficie pavimentata A_w/A_p*

L'utilizzo delle nuove variabili e quindi di questi ulteriori fattori di aggregazione permette di sviluppare un modello per l'analisi statistica più completo e dettagliato. In questa seconda analisi statistica non vengono riportati i risultati aggregati per località, orientazione prevalente, tipologia di edificio, estensione della superficie finestrata, tipologia di vetro perché sono già stati studiati nell' *Analisi Statistica 1*.

4.2.2.1 Aggregazione per dispersione delle superfici opache [Wh]

Per il calcolo della dispersione delle superfici opache (D_{op}) è stata utilizzata la formula:

$$D_{op} = \frac{\left(\sum S_{op}\right)}{R} \times GG$$

Definendo prima le altre grandezze:

- Resistenza termica *R* della parete

$$R = \sum_i \frac{d_i}{k_i}$$

dove d_i è lo spessore in metri dello strato i-esimo e k_i è la conducibilità termica del materiale dello strato i-esimo. Abbiamo considerato che le resistenze superficiali sono pari a 0.04 W/m^{2}K all'esterno e a 0.13 W/m^{2}K all'interno (per semplificare i calcoli è stato scelto il valore 0.13 anche se la norma UNI EN ISO 6946 assegna il valore 0.1 W/m^{2}K per i soffitti verso l' esterno e 0.17 W/m^{2}K per i pavimenti verso l' esterno).

- S_{op} è l'estensione delle superfici opache dell'edificio che si sta considerando
- *GG* sono i gradi giorno della località in cui è situato l'edificio

Nei grafici del fabbisogno invernale (Grafico 4.19) e del fabbisogno estivo (Grafico 4.20) è raffigurato l'andamento dei fabbisogni in funzione del fattore di aggregazione in esame.

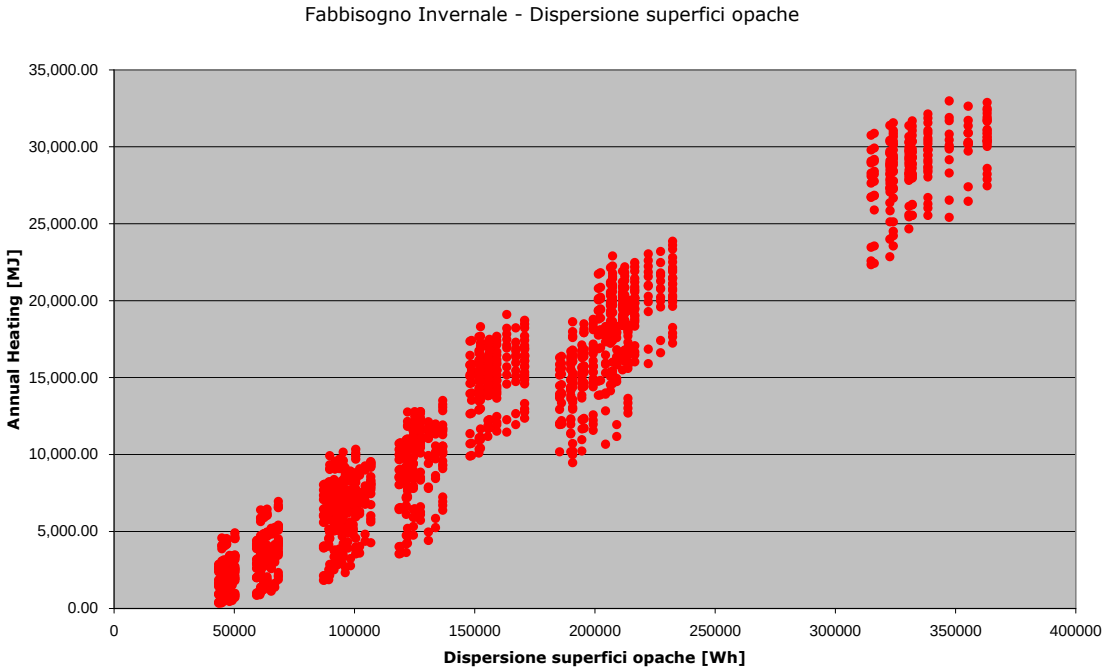


Grafico 4.19 – Fabbisogni invernali aggregati per dispersione delle superfici opache

In questo grafico dei fabbisogni invernali si può notare che i fabbisogni invernali per il riscaldamento dell'ambiente interno all'edificio studiato crescono linearmente con l'aumentare della dispersione delle superfici opache. Maggiore è la dispersione termica attraverso pareti, soffitto e pavimento maggiore è il fabbisogno energetico richiesto per riscaldare l'ambiente interno.

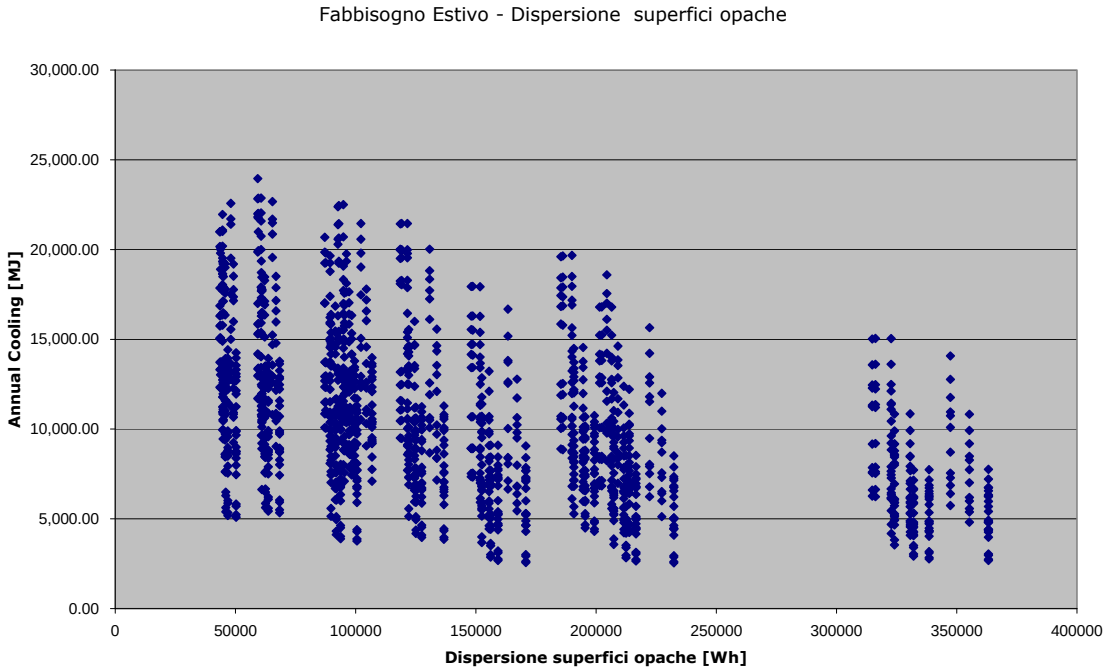


Grafico 4.20 - Fabbisogni estivi aggregati per dispersione delle superfici opache

Nel grafico dei fabbisogni estivi si nota un andamento leggermente discendente dei valori dei fabbisogni, anche se le differenze sono minime. Durante il periodo estivo la dispersione termica attraverso le pareti opache non provoca un aumento del fabbisogno energetico, contrariamente a quanto succede durante il periodo invernale.

Confrontando i risultati di questa aggregazione con quelli ottenuti nell'*Analisi Statistica 1* (*Paragrafo 4.2.1.2*) si può dire che è confermato sia l'andamento dei fabbisogni invernali sia quello dei fabbisogni estivi.
I fabbisogni invernali aumentano con l'aumentare della dispersione delle superfici opache che è dovuto alla diminuzione della resistenza termica della parete perché lo spessore di isolante è minore.
I fabbisogni estivi diminuiscono di poco con l'aumentare della dispersione attraverso le superfici opache perché ad un'elevata dispersione corrisponde un minor spessore di isolante.

4.2.2.2 Aggregazione per reciproco della costante di tempo dell'involucro

La costante di tempo dell'involucro *RC* è data dal prodotto della resistenza termica *R* per la capacità termica *C* , quest'ultima espressa come:

$$C = \sum_i d_i \times \rho_i \times cs_i$$

Dove d_i è lo spessore, ρ_i è la densità del materiale e *cs* è il calore specifico dello strato i-esimo che compone le pareti dell'involucro.

Il reciproco della costante di tempo

$$\frac{1}{R \times C}$$

è un parametro relativo all'involucro che indica quanto rapidamente le variazioni di temperatura interna seguano quelle della temperatura esterna.

Se la costante di tempo *RC* è bassa le variazioni di temperatura esterna si ripercuotono rapidamente sulla temperatura interna, viceversa con costante di tempo *RC* alta le variazioni di temperatura interna seguono quelle di temperatura esterna con un ritardo temporale tanto maggiore quanto più grande è la costante di tempo.

Una elevata costante di tempo RC si ottiene aumentando la resistenza termica dell'involucro quindi aumentando lo spessore si isolante.

I grafici dei fabbisogni invernali (Grafico 4.21) e dei fabbisogni estivi (Grafico 4.22) fanno vedere che tipo di dipendenza c'è tra fabbisogno e il reciproco della costante di tempo.

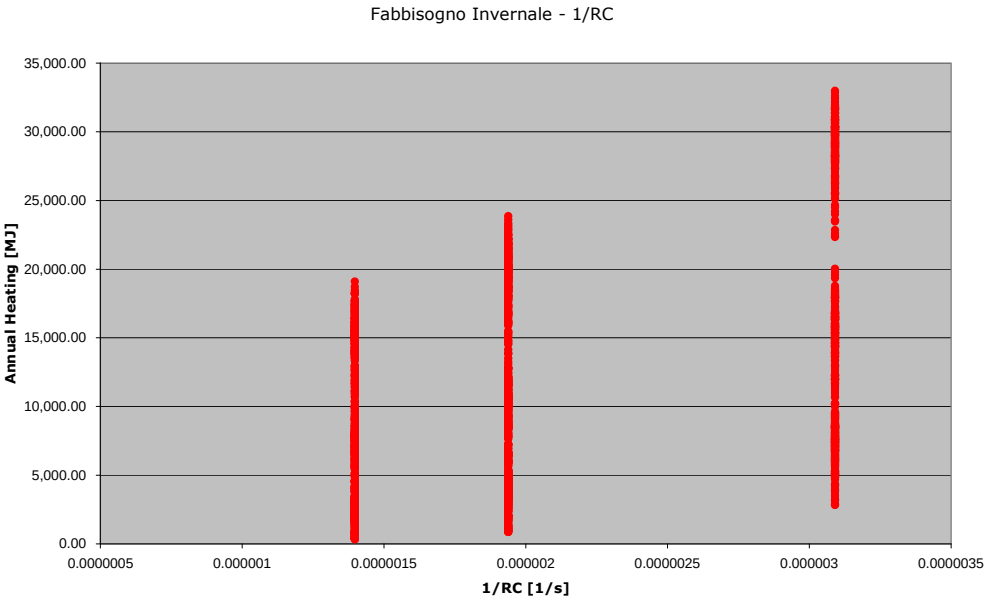


Grafico 4.21- Fabbisogni invernali

Dal grafico del fabbisogno invernale si vede l'esistenza di una proporzionalità diretta tra il fabbisogno energetico richiesto per il riscaldamento e l'inverso della costante di tempo RC, maggiore è la costante di tempo RC minore è il suo reciproco 1/RC e minore è il fabbisogno energetico in regime invernale.

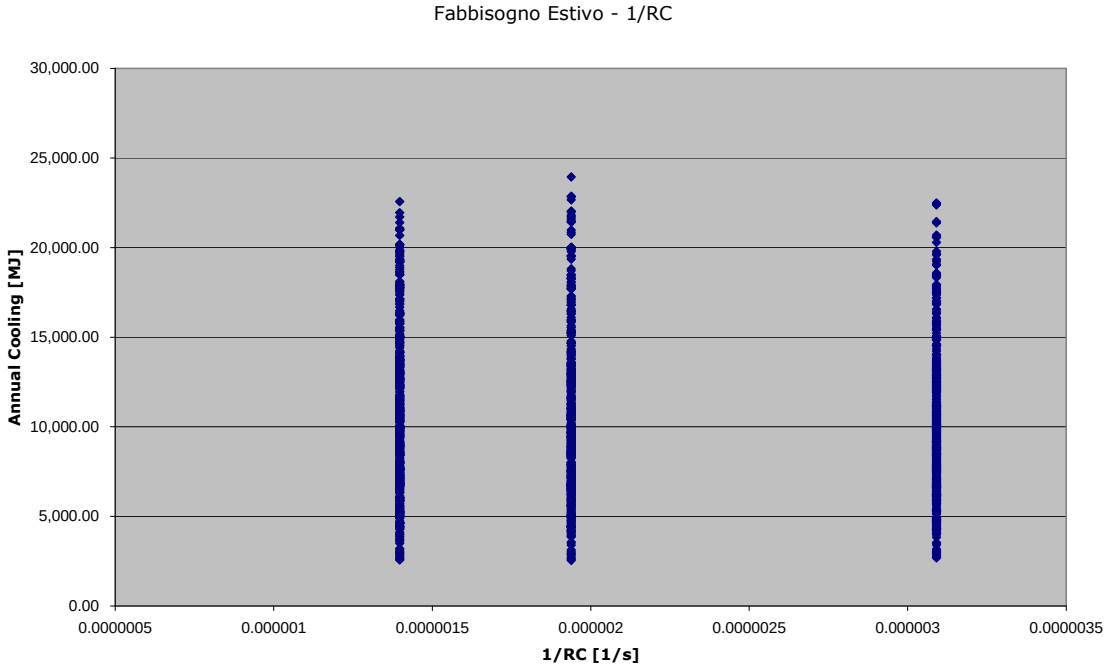


Grafico 4.22 – Fabbisogni estivi

Dal grafico del fabbisogno estivo si vede che l'andamento è pressoché costante, la costante di tempo *RC* non influisce in modo significativo nel calcolo del fabbisogno in regime di raffrescamento estivo perché lo strato di isolante è posto verso l'esterno, ponendo uno strato di isolante verso l'interno ci accorgeremo della differenza.
Nei grafici Grafico 4.21-4.22 è confermato l'andamento dei grafici Grafico 4.5-4.6 del *Paragrafo 4.2.1.2*: in regime invernale il fabbisogno aumenta se ho uno spessore di isolante minore, in regime estivo lo spessore dell'isolante non incide in modo significativo.

4.2.2.3 Aggregazione per Trasmittanza termica U_g e Fattore solare SHGC del vetro

Nella modellazione delle tipologie di vetro al software Window5 si è fatta attenzione ai parametri Trasmittanza termica U_g e soprattutto al Fattore solare SHGC.
Per la trasmittanza termica si è cercato di mantenere un valore per i sistemi vetrati a doppio vetro (circa 1.1 W/m^2K) e un valore per i sistemi vetrati con triplo vetro (da 0.7 a 0.9 W/m^2K).
Per quanto riguarda il fattore solare SHGC abbiamo definito "alto" un valore che si aggira attorno a 0.5 mentre abbiamo definito "basso" un valore di circa 0.3 .
I valori della deviazione standard, quelli medi, massimi e minimi dei fabbisogni estivi e invernali sono presenti nella Tabella 4.16 del *Paragrafo 4.2.1.5*.

Nei grafici contenuti in questo paragrafo si nota la dipendenza dei fabbisogni invernali ed estivi dai parametri caratteristici del vetro delle finestre.

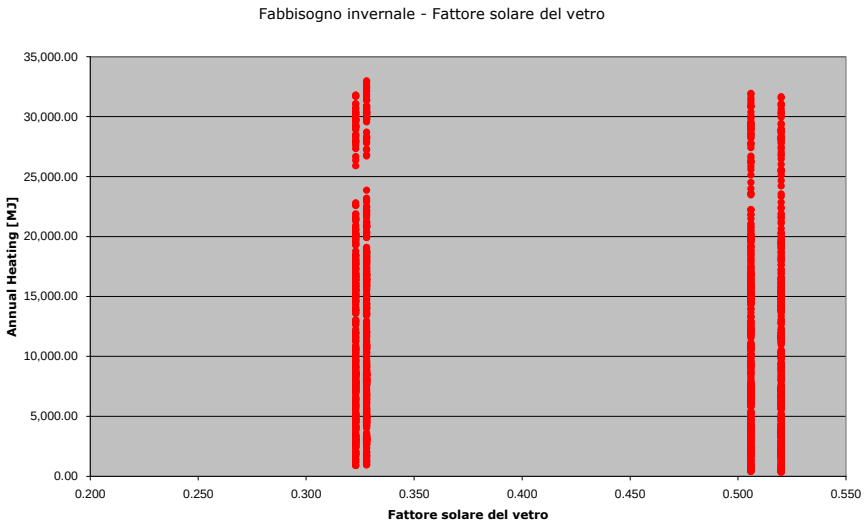


Grafico 3.24 – Fabbisogni invernali aggregati per valore del fattore solare del vetro

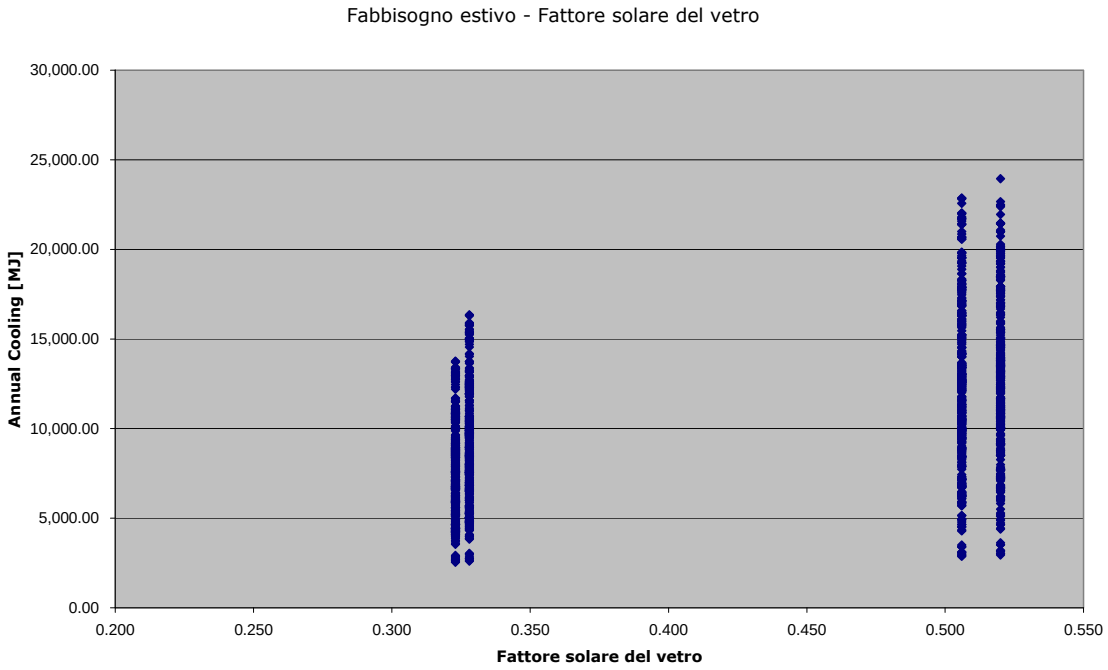


Grafico 3.25 - Fabbisogni estivi aggregati per valore del fattore solare del vetro

Nei grafici dei fabbisogni invernali ed estivi si nota che in regime invernale (Grafico 4.24) l'influenza del fattore solare non è significativa in termini di maggiore o minore richiesta energetica per il riscaldamento, in regime estivo (Grafico 4.25) il fabbisogno cresce linearmente con l'aumentare del fattore solare.

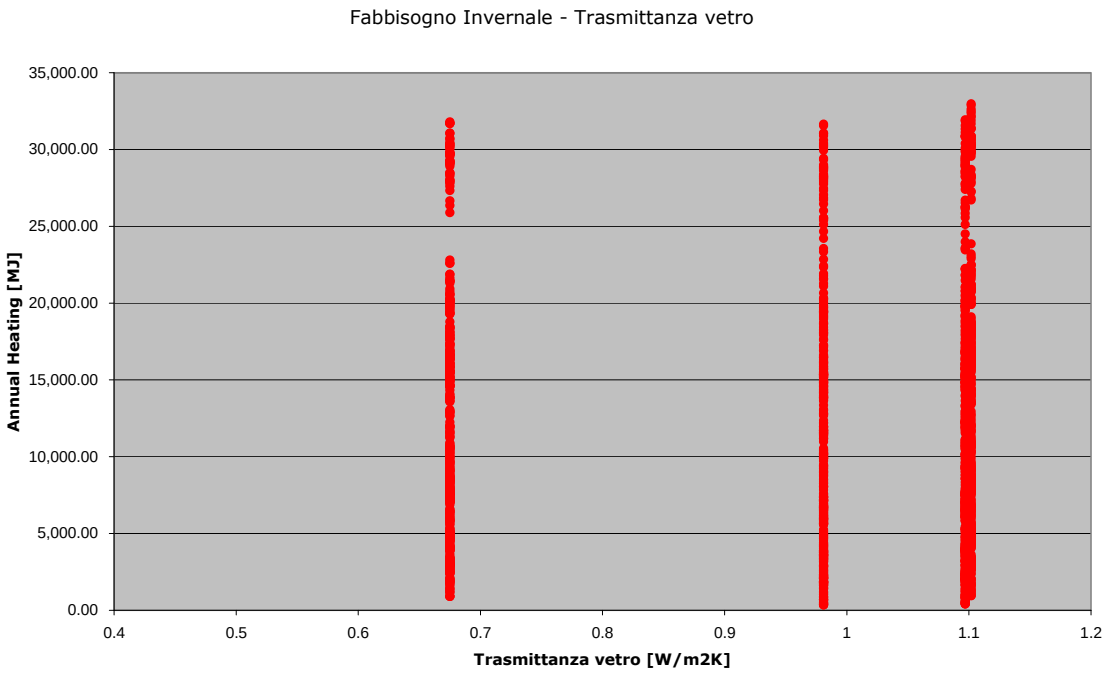


Grafico 4.26 – Fabbisogni invernali aggregati per trasmittanza termica del vetro

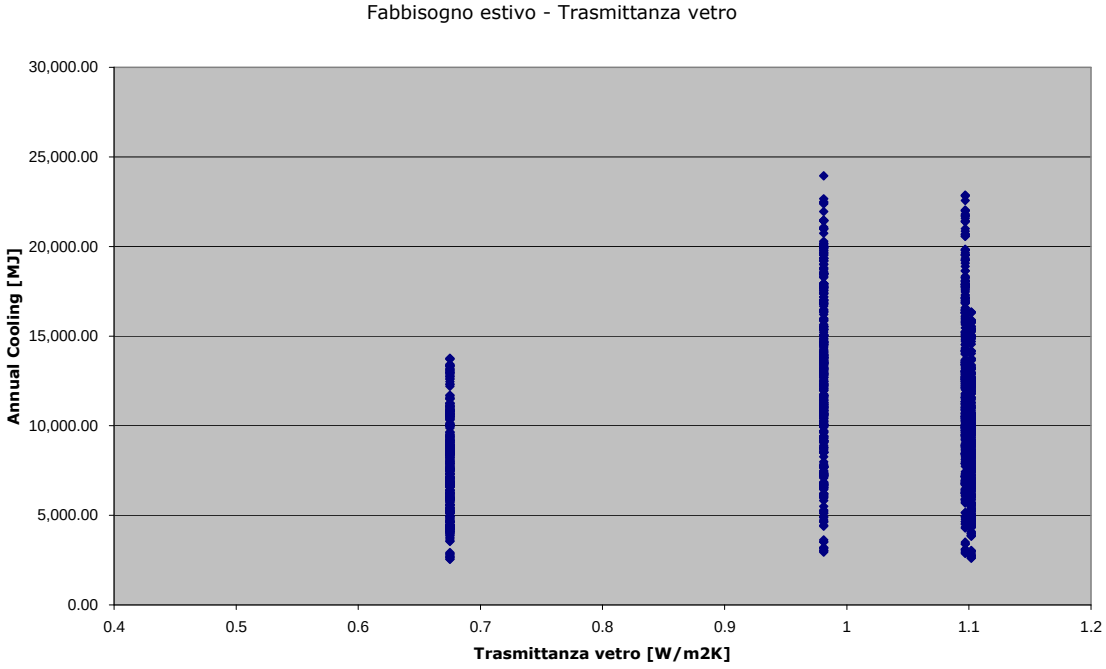


Grafico 3.27 – Fabbisogni estivi aggregati per trasmittanza termica del vetro

Aggregando i fabbisogni invernali (Grafico 4.26) e quelli estivi (Grafico 4.27) a seconda della trasmittanza termica del vetro si vede che in regime invernale essa non incide in modo significativo nei fabbisogni, in regime estivo invece si vedono delle differenze tra i dati relativi ai vari valori, si può notare che la

trasmittanza 1.097 W/m^{2}K e quella 1.102 W/m^{2}K assicurano fabbisogni diversi anche se i valori sono molto vicini tra loro, probabilmente perché i valori dei fabbisogni estivi dipendono maggiormente dal fattore solare che dalla trasmittanza termica.

4.2.2.4 Aggregazione per dispersione delle superfici vetrate [Wh]

Per il calcolo della dispersione delle superfici vetrate (D_{vetri}) è stata utilizzata la seguente formula:

$$D_{vetri} = U_g \times S_{vetrata} \times GG$$

dove U_g è la trasmittanza termica del vetro della superficie vetrata, $S_{vetrata}$ è la superficie vetrata complessiva per quella determinata tipologia di edificio e orientazione, *GG* sono i gradi giorno della località in cui è situato l'edificio.

I seguenti grafici riportano l'andamento del fabbisogno invernale (Grafico 4.28) e quello del fabbisogno estivo (Grafico 4.29) in funzione della dispersione della superficie vetrata:

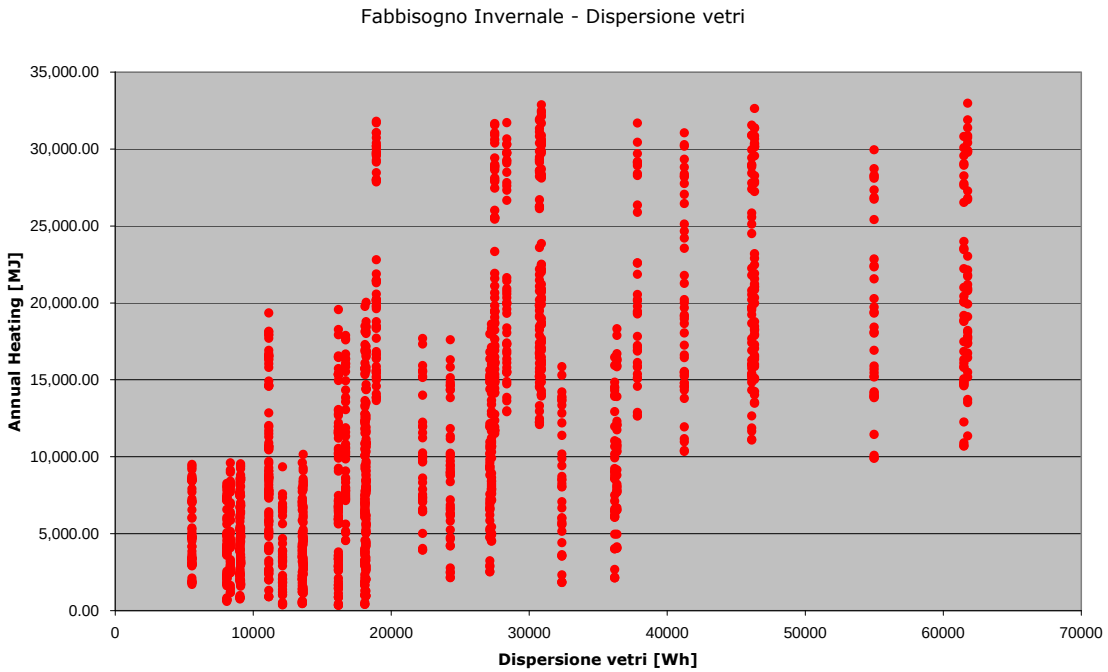


Grafico 4.28 – Fabbisogni invernali aggregati per energia dispersa attraverso le superfici vetrata

Dal grafico dei fabbisogni invernali emerge una dipendenza diretta con la dispersione delle superfici vetrate, i fabbisogni aumentano linearmente con l'aumentare della dispersione dei vetri.
Dalla formula utilizzata per calcolare la dispersione delle superfici vetrate si capisce che la dispersione è maggiore se aumenta la superficie vetrata, se la trasmittanza del vetro è maggiore e se considero località con un valore elevato di gradi giorno (periodo di riscaldamento/raffrescamento più lungo perché le differenze di temperatura tra interno ed esterno sono maggiori), all'aumentare di questi termini aumenta anche il fabbisogno per il riscaldamento in regime invernale.

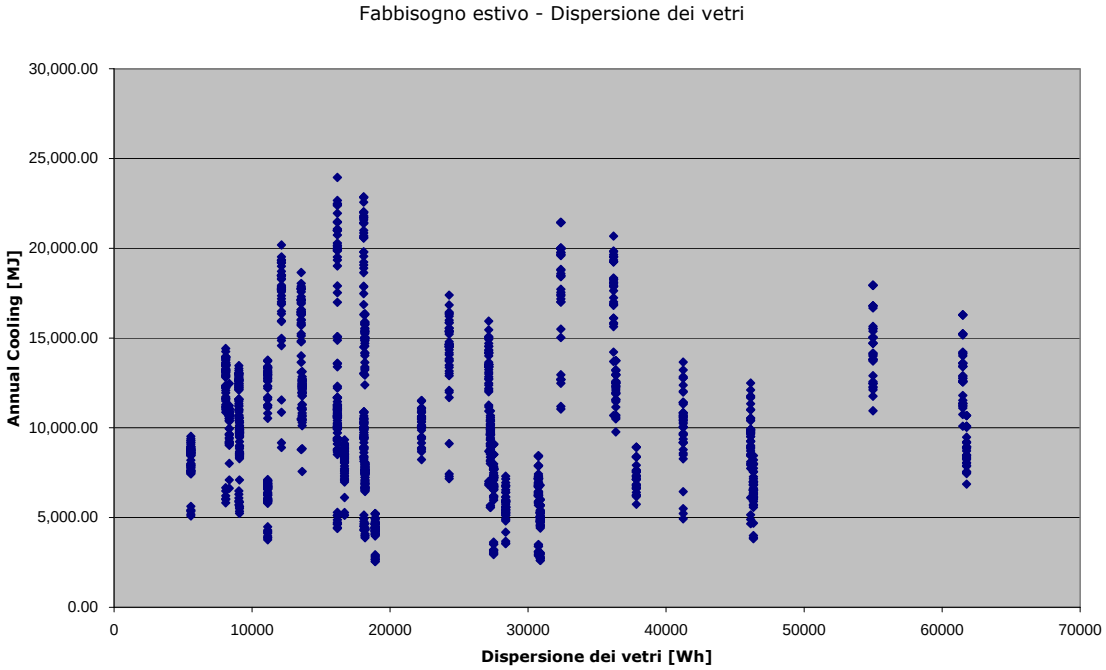


Grafico 4.29 - Fabbisogni estivi aggregati per energia dispersa attraverso le superfici vetrata

Nel grafico dei fabbisogni estivi si vede che la dispersione delle superfici vetrate non influisce in modo significativo sulla richiesta energetica per il raffrescamento durante il periodo estivo, si nota un andamento costante dei valori e ciò sta ad indicare che se aumenta la dispersione delle superfici vetrate diminuisce sensibilmente il fabbisogno estivo.
Le dispersioni termiche sono quasi sempre un flusso termico dall'interno verso l'esterno perciò fanno diminuire la temperatura interna, le maggiori dispersioni si hanno dove le superfici vetrate sono maggiori e quindi è maggiore l'apporto di

radiazione entrante, questo spiega l'andamento costante dei valori del fabbisogno in regime estivo.

4.2.2.5 Aggregazione per radiazione entrante nella zona studiata

La radiazione entrante ($Rad_{entrante}$) attraverso la superficie vetrata è una frazione della radiazione incidente in quella determinata zona, la possiamo calcolare con la seguente formula:

$$Rad_{entrante_i} = S_{vetrata} \times SHGC \times Rad\ inc._i$$

La radiazione entrante dipende:

- dalla superficie vetrata ($S_{vetrata}$), un aumento dell'area vetrata comporta un aumento della radiazione entrante
- dal fattore solare *SHGC,* maggiore è il fattore solare più radiazione solare incidente entra nella zona considerata
- dalla radiazione incidente Rad_{inc} della zona in cui è situato l'edificio, maggiore è la radiazione incidente maggiore sarà la radiazione entrante

I grafici seguenti riportano l'andamento dei fabbisogni invernali (Grafico 4.30) e dei fabbisogni estivi (Grafico 4.31) in funzione della radiazione entrante.

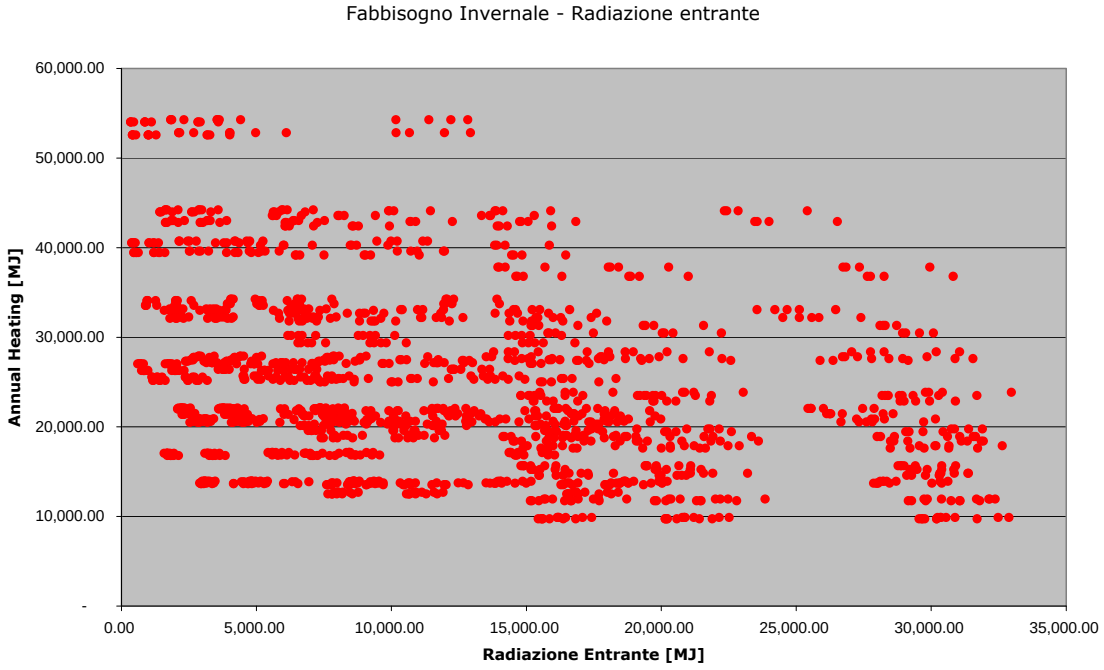


Grafico 4.30 – Fabbisogno invernale aggregato per radiazione entrante

Nel grafico dei fabbisogni invernali si nota un andamento leggermente discendente perché all'aumentare della radiazione entrante c'è una lieve diminuzione del fabbisogno richiesto per il riscaldamento dell'ambiente interno.

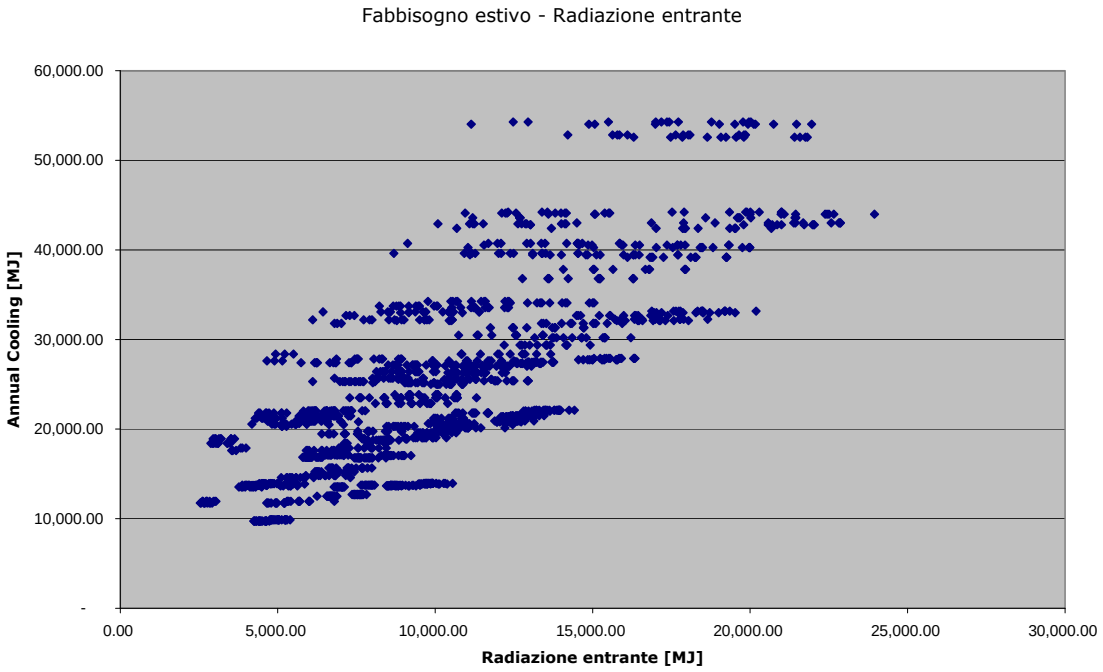


Grafico 4.31 – Fabbisogno estivo aggregato per radiazione entrante

Nel grafico dei fabbisogni estivi si nota una dipendenza forte tra la radiazione entrante e il fabbisogno richiesto per il raffrescamento, il quale cresce linearmente con l'aumentare della radiazione entrante.

4.2.2.6 Aggregazione per radiazione incidente sulle superfici opache

La radiazione incidente sulle superfici opache ($Rad_{sup.op.}$) è la frazione della radiazione solare incidente che non entra dalle superfici vetrate ma che incide sulle superfici opache dell'edificio.

La formula per il calcolo della radiazione incidente sulle superfici opache è la seguente:

$$Rad_{sup.op.} = Rad_{inc} \times S_{op}$$

Le superfici opache S_{op} si ottengono sottraendo la superficie vetrata dalla superficie della parete studiata, poi deve essere sommata anche la copertura dell'edificio.

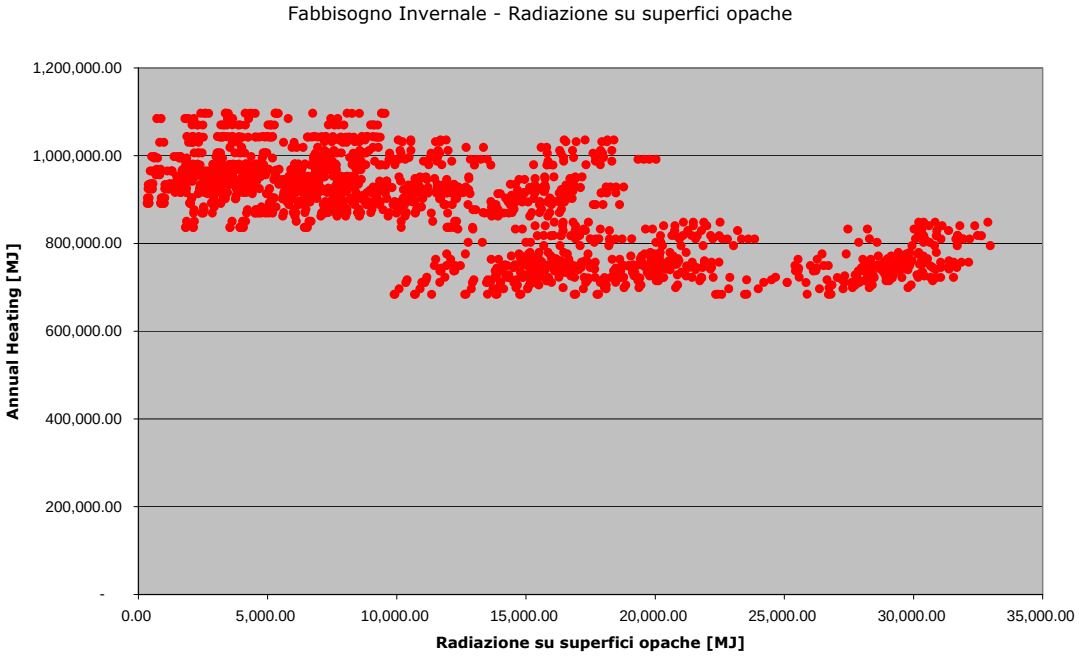


Grafico 4.32 – Fabbisogno invernale

Nel Grafico 4.32 si nota un andamento discendente dei fabbisogni invernali, diminuiscono lievemente con l'aumentare della radiazione sulle superfici opache. Le variazioni di fabbisogno dovute a diversi valori della radiazione incidente sulle superfici opache non sono di grande entità, ma sono contenute.

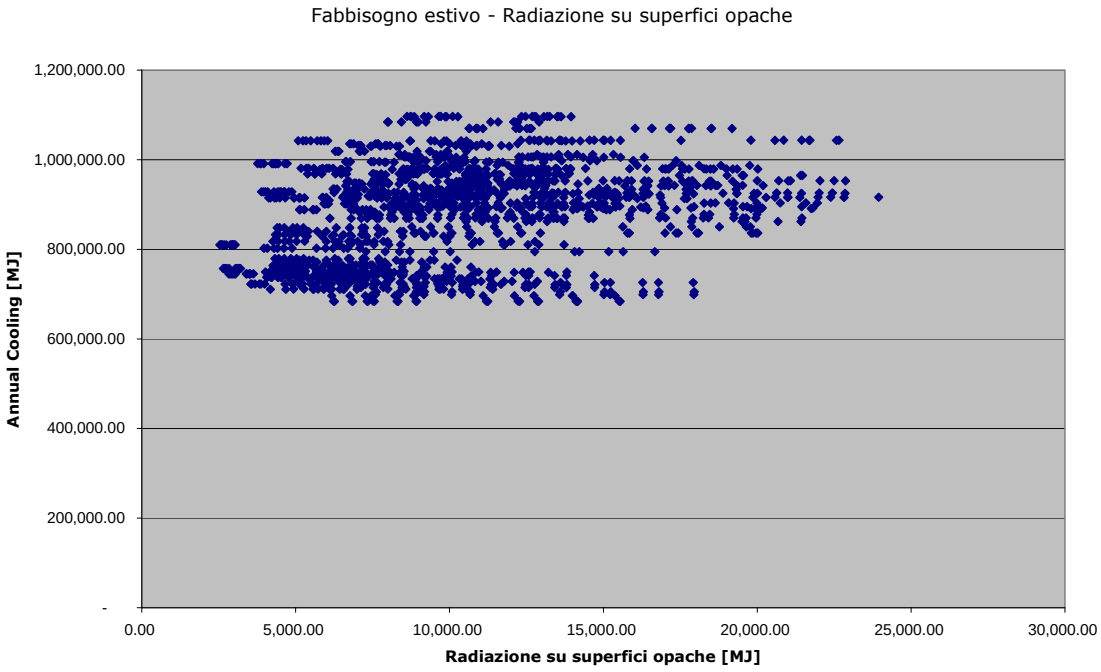


Grafico 4.33 – Fabbisogni estivi

Nel Grafico 4.33 relativo ai fabbisogni estivi si nota che c'è una lieve dipendenza lineare diretta tra radiazione incidente sulle superfici opache e il fabbisogno estivo di energia per il raffrescamento.
Ad un aumento della radiazione incidente sulle superfici opache corrisponde un aumento, seppur lieve, del fabbisogno energetico per il raffrescamento; le variazioni non sono di grande entità ma raggruppate in un range ristretto.

4.3 Analisi statistiche di regressione

In questa seconda parte del capitolo vengono presentati i concetti che stanno alla base delle analisi statistiche di regressione e sono riportati i risultati delle analisi statistiche realizzate con il software *SPSS Statistics 18.0.*

4.3.1 Regressione lineare semplice

Il modello di regressione lineare semplice è uno dei modelli di analisi statistica di regressione più utilizzati.
Questo modello permette di stimare la relazione esistente tra due variabili, cioè tra la variabile dipendente *y* (nel nostro caso il fabbisogno energetico) e la variabile indipendente (o esplicativa) *x,* attraverso un campione di osservazioni.
L'obbiettivo del modello di regressione lineare semplice è di mettere in relazione le due variabili per trovare la retta che approssima la relazione tra *x* e *y* attraverso l'equazione:

$$y_t = \alpha + \beta x_t + \varepsilon_t$$

dove i termini che la compongono sono:

- α è l'intercetta della retta di regressione
- β è il coefficiente angolare
- ε_i è l'errore di misura

Le ipotesi che stanno alla base del modello sono:

- x è una variabile deterministica
- E(ε_i)=0, il valore medio degli errori è nullo
- Var(ε_i)=σ^2, varianza costante
- Cov(ε_i;ε_j)=0, indipendenza dei residui

Il metodo dei minimi quadrati è quello che meglio permette di ottenere una retta che meglio esprime la relazione $y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i$, questo metodo permette di stimare e calcolare la retta $\hat{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x_i$ che minimizza le differenze tra i valori misurati y_i e i valori stimati $\hat{y}_i$.

Indicando con *S* la sommatoria dei quadrati delle differenze tra i valori misurati y_i e i valori stimati $\hat{y}_i$:

$$S = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta} x_i)^2$$

ora si minimizza la funzione considerando i coefficienti $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$.
Derivando la funzione *S* rispetto a $\hat{\alpha}$ e ponendo la derivata uguale a zero otteniamo il valore di $\hat{\alpha}$ che minimizza *S:*

$$\frac{dS}{d\hat{\alpha}} = -2 \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta} x_i) = 0$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{\beta} x_i) = (\bar{y} - \hat{\beta} \bar{x})$$

dove $\bar{y}, \bar{x}$ sono le medie osservate.
Ottenuto il valore di $\hat{\alpha}$ lo sostituiamo nell'equazione della funzione *S*, deriviamo rispetto a $\hat{\beta}$ e poniamo tale derivata uguale a zero per trovare il valore di $\hat{\beta}$ che minimizza la funzione *S*:

$$S = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y} + \hat{\beta} \bar{x} - \hat{\beta} x_i)^2 = min_{\hat{\beta}} \sum_{i=1}^{n} [(y_i - \bar{y}) - \hat{\beta} (x_i - \bar{x})]^2$$

$$\frac{dS}{d\hat{\beta}} = -2 \sum_{i=1}^{n} [(y_i - \bar{y}) - \hat{\beta} (x_i - \bar{x})](x_i - \bar{x}) = 0$$

$$\sum_{i=1}^{n} [(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})] = \hat{\beta} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^{n} [(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})]}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$

Il membro al numeratore e quello al denominatore divisi entrambi per *n* mi danno la covarianza e la varianza, tale che:

$$\hat{\beta} = \frac{cov(x,y)}{var(x,y)}$$

Per misurare la variabilità nella regressione si devono definire:

- $SST = Dev\ (Y) = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$, devianza totale di Y
- $SSR = Dev\ (Y)_{reg} = \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2$, devianza di regressione di Y
- $SSE = Dev\ (Y)_{disp} = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$, devianza di dispersione di Y

dove $Dev\ (Y) = Dev\ (Y)_{reg} + Dev\ (Y)_{disp}$.

Un altro importante coefficiente che permette di valutare la bontà del modello di regressione lineare è il *coefficiente di determinazione* R^2 che viene calcolato come rapporto tra la somma dei quadrati della regressione e la somma totale dei quadrati:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{Dev\ (Y)_{reg}}{Dev\ (Y)} = \frac{\hat{\beta}^2 \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} = \frac{COV(x,y)^2}{V(x)V(y)}$$

I valori del coefficiente di determinazione variano tra 0 e 1, più sono vicini a 1 tanto migliore è il modello.
Sui coefficienti stimati è necessario fare un test statistico per vedere se è possibile generalizzarli o meno alla popolazione di riferimento, la statistica usata è una *statistica test t* che segue una distribuzione *t di Student a n-2 gradi di libertà*.

4.3.2 Regressione lineare multivariata

Il modello di regressione lineare multivariata è l'estensione del modello di regressione lineare semplice a $x_{k,i}$ (con k=1,..,m) variabili indipendenti che contribuiscono a determinare la variabile dipendente y_i.
I parametri del modello sono stimati a partire da un campione casuale di *n* unità sulle quali viene rilevato il valore della variabile *y* e dei relativi *m* regressori *x*.

Il modello di regressione lineare multivariata è espresso da *n* equazioni del tipo:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{t1} + \beta_2 x_{t2} + \cdots + \beta_k x_{k1} + \beta_m x_{m1} + \varepsilon_t$$

dove:

- *i* è il numero di osservazioni a cui si fa riferimento, varia da 1 a n
- *k* è il numero di variabili indipendenti, varia da 1 a m
- x_{ki} è il valore della k-esima variabile indipendente riferita alla i-esima osservazione
- β_0 è il valore della variabile indipendente *y* quando i regressori sono nulli
- ε_i è l'errore della misura

Possiamo scrivere il modello in forma matriciale

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & x_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & x_{n,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad ovvero \quad \boldsymbol{Y = \beta X + \varepsilon}$$

dove:

- **Y** è il vettore *nx1* dei valori della variabile dipendente *y* per le *n* unità del campione
- **X** è la matrice *nx(m+1)* dei valori delle variabili indipendenti delle *n* osservazioni
- **β** è il vettore *(m+1)x1* dei coefficienti del modello
- **ε** è il vettore degli *nx1* errori

Le ipotesi sono le stesse del modello di regressione lineare semplice.

Anche per la regressione lineare multivariata si ricorre al metodo dei minimi quadrati per calcolare il valore dei coefficienti del vettore di stima $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ che ci consente di determinare il vettore dei valori teorici della variabile dipendente $\hat{\boldsymbol{Y}}$ per le n-osservazioni del campione considerato**.**

$$\hat{\boldsymbol{Y}} = \hat{\boldsymbol{\beta}} \boldsymbol{X}$$

con $\hat{y}_t = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{t1} + \cdots + \hat{\beta}_m x_{tm}$ per *i=1,…,n.*

Otteniamo il vettore dei residui **e** sottraendo i valori stimati del vettore $\hat{Y}$ ai valori reali del vettore **Y :**

$$e = (Y - \hat{Y})$$

con: $e_t = y_t - \hat{y}_t = y_t - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{t1} - \ldots - \hat{\beta}_m x_{tm}$ per *i=1,..,n.*

Con il metodo dei minimi quadrati si trova il vettore dei coefficienti di stima $\hat{\beta}$ che rende minima la somma dei quadrati degli scarti tra i valori di ordinata effettiva e ordinata stimata, cioè rende minima la somma del quadrato dei residui:

$$\Phi(\beta) = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} e_i^2 = e^T e = (Y - X\hat{\beta})^T (Y - X\hat{\beta}) = Y^T Y - \hat{\beta}^T X^T Y - Y^T X\hat{\beta} + \hat{\beta}^T X^T X\hat{\beta}$$

Derivando la somma dei residui al quadrato $\Phi(\beta)$ rispetto a $\hat{\beta}$ e ponendo il tutto uguale a zero otteniamo:

$$\frac{d\Phi(\beta)}{d\hat{\beta}} = -2X^T Y + 2X^T X\hat{\beta} = 0$$

quindi:

$$\hat{\beta} = \frac{X^T Y}{X^T X}$$

La variabilità della regressione si può definire attraverso le devianze che possono essere espresse come norma dei vettori:

- $SST = Dev(Y) = \|y\|_2^2$
- $SSR = Dev(Y)_{regr} = \|\hat{y}\|_2^2$
- $SSE = Dev(Y)_{disp} = \|y - \hat{y}\|_2^2$

Con le quali è possibile calcolare il *coefficiente di determinazione* R^2 come:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{Dev\,(Y)_{reg}}{Dev\,(Y)} = \frac{\|\hat{y}\|_2^2}{\|y\|_2^2}$$

Se il numero di variabili è molto alto il coefficiente R^2 non risulta molto efficacie a determinare la bontà del modello perciò si preferisce adottare il *coefficiente di determinazione* $R^2_{adjusted}$ (R2 modificato):

$$R^2_{adjusted} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n-1)}{n-(k+1)}$$

Nella regressione lineare multivariata si può sfruttare un altro parametro per valutare il modello, il *VIF (Variable Inflaction Factor):*

$$VIF = \frac{1}{1 - R_j^2}$$

dove R_j^2 è il coefficiente di determinazione del modello calcolato rispetto alla variabile j-esima, se VIF è maggiore di 5 conviene eliminare alcune variabili esplicative.

Come per la regressione lineare semplice, anche in quella multivariata, sui coefficienti stimati è necessario fare un test statistico per vedere se è possibile generalizzarli o meno alla popolazione di riferimento, la statistica usata è una *statistica test t* che segue una distribuzione *t di Student a n-(k+1) gradi di libertà*.

4.3.3 Software SPSS Statistics 18.0

Il software SPSS è uno tra i più utilizzati per eseguire analisi statistiche perché fornisce numerosi strumenti tra cui: statistiche descrittive, statistiche test, modelli di regressione e di correlazione, ecc….

Con SPSS è possibile importare i dati contenuti nei file *Excel,* facendo attenzione che per l'analisi di regressione non ci devono essere valori sottoforma di stringa ma solo valori numerici, quindi sarà opportuno assegnare alle varie stringhe un valore numerico riportandolo in una legenda.

Dopo aver importato il file si nota che ci sono due schermate principali: Visualizzazione Variabili (Figura 4.34) e Visualizzazione Dati (Figura 4.35).

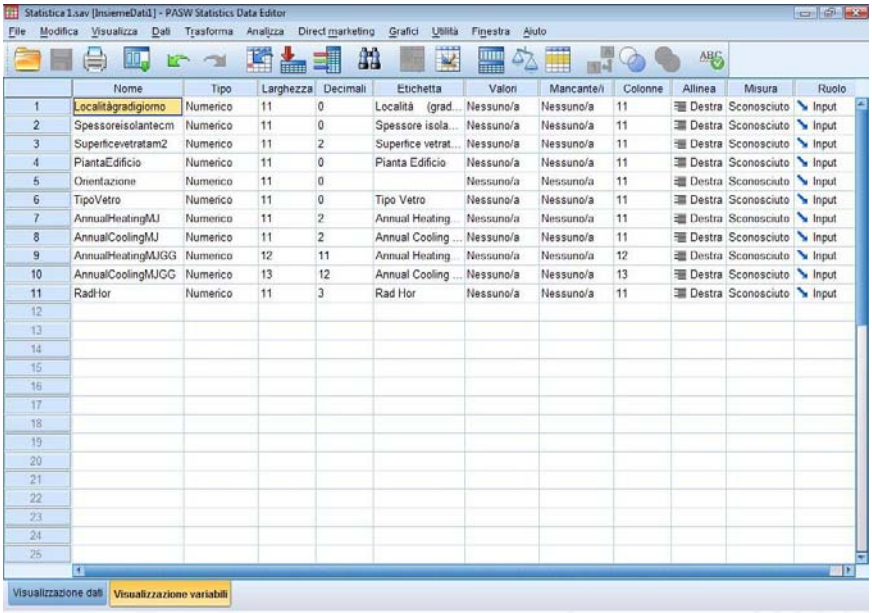

Statistica1.sav [InsiemeDati1] - PASW Statistics Data Editor
File Modifica Visualizza Dati Trasforma Analizza Direct marketing Grafici Utilità Finestra Aiuto
Nome Tipo Larghezza Decimali Etichetta Valori Mancante/i Colonne Allinea Misura Ruolo
1 Localitàgradigiorno Numerico 11 0 Località (grad... Nessuno/a Nessuno/a 11 Destra Sconosciuto Input
2 Spessoreisolantecm Numerico 11 0 Spessore isola... Nessuno/a Nessuno/a 11 Destra Sconosciuto Input
3 Superficevetratam2 Numerico 11 2 Superfice vetrat... Nessuno/a Nessuno/a 11 Destra Sconosciuto Input
4 PiantaEdificio Numerico 11 0 Pianta Edificio Nessuno/a Nessuno/a 11 Destra Sconosciuto Input
5 Orientazione Numerico 11 0 Nessuno/a Nessuno/a 11 Destra Sconosciuto Input
6 TipoVetro Numerico 11 0 Tipo Vetro Nessuno/a Nessuno/a 11 Destra Sconosciuto Input
7 AnnualHeatingMJ Numerico 11 2 Annual Heating... Nessuno/a Nessuno/a 11 Destra Sconosciuto Input
8 AnnualCoolingMJ Numerico 11 2 Annual Cooling ... Nessuno/a Nessuno/a 11 Destra Sconosciuto Input
9 AnnualHeatingMJGG Numerico 12 11 Annual Heating... Nessuno/a Nessuno/a 12 Destra Sconosciuto Input
10 AnnualCoolingMJGG Numerico 13 12 Annual Cooling ... Nessuno/a Nessuno/a 13 Destra Sconosciuto Input
11 RadHor Numerico 11 3 Rad Hor Nessuno/a Nessuno/a 11 Destra Sconosciuto Input
Visualizzazione dati
Visualizzazione variabili

Figura 4.34 – SPSS, Visualizzazione Variabili

Nella schermata "Visualizzazione Variabili" (in Figura 4.34) troviamo le variabili da noi definite nel foglio di lavoro *Excel*, in questa schermata possiamo: modificare il nome delle variabili, indicare il "tipo" di variabile (nel nostro caso tutte "numeriche"), descrivere brevemente la variabile con "un' etichetta", modificare il numero di decimali, larghezza colonne, gestione dei numeri mancanti, allineamento, ecc….

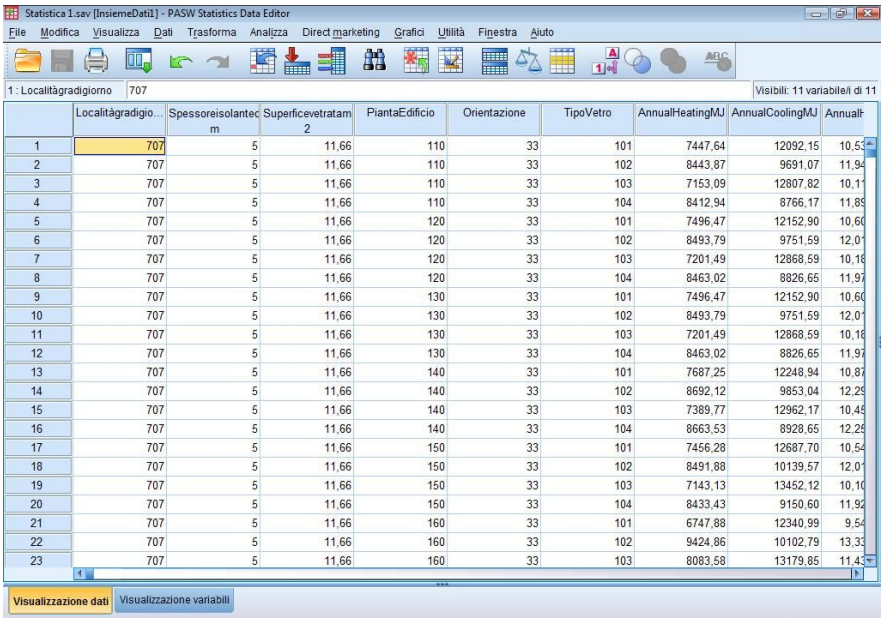


Figura 4.35 – SPSS, Visualizzazione Dati

Nella schermata "Visualizzazione Dati" (in Figura 4.35) troviamo i valori assegnati alle variabili, importate dal software direttamente dal foglio di lavoro *Excel*.

L'utilizzo di questo software ci ha permesso di eseguire analisi statistiche di regressione lineare multivariata sui dati ottenuti dalle simulazioni fatte.
La variabile dipendente e le variabili indipendenti considerate nell'analisi devono essere selezionate nella schermata in Figura 4.36 (relativa alla regressione lineare), nel nostro caso come metodo di analisi si è scelto il "metodo per passi" che consente l'ingresso di una nuova variabile nel modello solo se il *p-value* risulta inferiore o uguale a 0.05, con un valore maggiore di 0.1 la variabile è rimossa (il *p-value* è il parametro utilizzato per valutare se il modello di regressione analizzato è significativo nel spiegare la variabilità delle variabili indipendenti) :

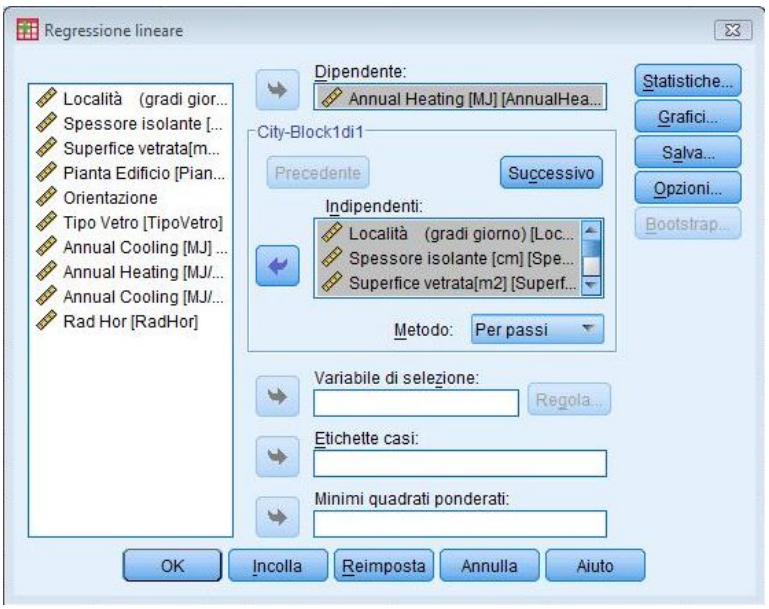


Figura 4.36 – SPSS, Regressione Lineare

Da questa schermata è possibile accedere ad altre schermate che ci permettono di scegliere il tipo di analisi statistiche da eseguire, determinare i coefficienti di regressione, definire il tipo di analisi dei residui e scegliere i grafici che illustrano l'andamento del modello di regressione lineare.

In Figura 4.37 troviamo la schermata relativa alle analisi statistiche da noi selezionate

Figura 4.37 – SPSS, Regressione Lineare, Statistiche

In Figura 4.38 troviamo la schermata relativa ai grafici che devono essere visualizzati nell'analisi statistica.

Figura 4.38 – SPSS, Regressione Lineare, Grafici

Nei paragrafi seguenti verranno riportati i risultati delle analisi statistiche di regressione lineare svolti sui modelli relativi alla "Analisi statistica 1" e alla "Analisi statistica 2".

4.3.4 Analisi Statistica 1

In questa prima analisi statistica sono stati ricavati i modelli di regressione lineare multivariata per:

- Fabbisogno invernale [MJ]
- Fabbisogno estivo [MJ]

Le variabili indipendenti considerate in questa prima analisi sono sia di tipo numerico che categoriale, a queste ultime sono stati assegnati dei valori numerici per poter essere considerate ai fini dell'analisi statistica di regressione lineare.

Le variabili indipendenti di tipo numerico sono:

- Località: ogni località è caratterizzata dal valore relativo dei *gradi giorno*;
- Spessore di isolante: lo spessore di isolante è espresso in *cm*;
- Superficie vetrata: l'estensione della superficie vetrata è espressa in m^2;
- Radiazione orizzontale: è la radiazione incidente sul piano orizzontale per le tre località analizzate;

Le variabili indipendenti di natura categoriale nominale sono:

- Pianta dell'edificio: in Tabella 4.39 sono elencati i valori numerici assegnati a ciascuna tipologia di pianta dell'edificio;
- Orientazione: in Tabella 4.40 sono elencati i valori numerici assegnati alle tre orientazioni preferenziali considerate nell'analisi;
- Tipo Vetro: in Tabella 4.41 sono elencati i valori numerici assegnati alle quattro tipologie di vetro considerate.

Tipologia Edificio	Valore numerico per la variabile categoriale
1:1	110
3:4 N/S	120
3:4 E/O	130
1:2 N/S	140
1:2 E/O	150
1:4 N/S	160
1:4 E/O	170

Tabella 4.39

Orientazione Preferenziale	Valore numerico per la variabile categoriale
SUD	11
OVEST	22
EST	33

Tabella 4.40

Tipologia Vetro	Valore Numerico per la variabile categoriale
Doppio SHGC Alto	101
Doppio SHGC Basso	102
Triplo SHGC Alto	103
Triplo SHGC Basso	104

Tabella 4.41

4.3.4.1 Analisi fabbisogni invernali

Tabella 4.42 - Riepilogo del modello[g]

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Deviazione standard Errore della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	Sig. Variazione di F	
1	,835[a]	,697	,697	4574,95872	,697	3967,530	1	2,E3	,000	
2	,949[b]	,901	,901	2618,02227	,204	3545,702	1	2,E3	,000	
3	,961[c]	,924	,923	2298,91638	,023	513,121	1	2,E3	,000	
4	,963[d]	,927	,927	2249,28002	,003	77,929	1	2,E3	,000	
5	,964[e]	,929	,929	2213,44124	,002	57,247	1	2,E3	,000	
6	,964[f]	,929	,929	2209,94165	,000	6,458	1	2,E3	,011	,586

a. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno)

b. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Spessore isolante [cm]

c. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Spessore isolante [cm], Orientazione

d. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Spessore isolante [cm], Orientazione, Pianta Edificio

e. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Spessore isolante [cm], Orientazione, Pianta Edificio, Superfice vetrata[m2]

f. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Spessore isolante [cm], Orientazione, Pianta Edificio, Superfice vetrata[m2], Tipo Vetro

g. Variabile dipendente: Annual Heating [MJ]

Primo modello di regressione multivariata per i fabbisogni invernali

In Tabella 4.42 possiamo vedere che è stato scelto il modello *6* perché ha *indice di determinazione* R^2 più alto e deviazione standard dell'errore della stima più basso.

In Tabella 4.43 sono elencati i coefficienti assegnati alle variabili incluse nei modelli:

Tabella 4.43 - Coefficienti[a]

Modello		Coeff non std		Coeff std		Correlazioni			Statistiche di collinearità	
		B	Deviazione standard Errore	Beta	t	Ordine zero	Parziali	Parziali indipendenti	Tolleranza	VIF
1	(Costante)	-3137,576	262,737		-11,942					
	Località (GG)	9,961	,158	,835	62,988	,835	,835	,835	1,000	1,000
2	(GG)	6048,462	215,417		28,078					
	Località (gradi giorno)	9,961	,090	,835	110,071	,835	,936	,835	1,000	1,000
	Spessore isolante [cm]	-918,604	15,427	-,452	-59,546	-,452	-,820	-,452	1,000	1,000
3	(Costante)	2979,887	232,663		12,808					
	Località (GG)	9,961	,079	,835	125,350	,835	,949	,835	1,000	1,000
	Spessore isolante [cm]	-918,604	13,546	-,452	-67,811	-,452	-,853	-,452	1,000	1,000
	Orientazione	139,481	6,157	,151	22,652	,151	,479	,151	1,000	1,000
4	(Costante)	-359,769	441,522		-,815					
	Località (GG)	9,961	,078	,835	128,116	,835	,951	,835	1,000	1,000

	Spessore isolante [cm]	-918,604	13,254	-,452	-69,308	-,452	-,858	-,452	1,000	1,000
	Orientazione	142,874	6,037	,155	23,667	,151	,495	,154	,996	1,004
	Pianta Edificio	23,890	2,706	,058	8,828	,048	,208	,058	,996	1,004
5	(Costante)	1381,968	491,702		2,811					
	Località (GG)	9,961	,077	,835	130,191	,835	,953	,835	1,000	1,000
	Spessore isolante [cm]	-918,604	13,043	-,452	-70,430	-,452	-,862	-,452	1,000	1,000
	Orientazione	142,540	5,941	,154	23,993	,151	,501	,154	,996	1,004
	Pianta Edificio	21,535	2,681	,052	8,031	,048	,190	,051	,983	1,018
	Superficie vetrata[m2]	-86,142	11,385	-,049	-7,566	-,055	-,179	-,049	,987	1,014
6	(Costante)	-11004,034	4898,575		-2,246					
	Località (GG)	9,961	,076	,835	130,397	,835	,953	,835	1,000	1,000
	Spessore isolante [cm]	-918,604	13,022	-,452	-70,541	-,452	-,862	-,452	1,000	1,000
	Orientazione	142,540	5,931	,154	24,031	,151	,501	,154	,996	1,004
	Pianta Edificio	21,535	2,677	,052	8,044	,048	,190	,051	,983	1,018
	Superficie vetrata[m2]	-86,142	11,367	-,049	-7,578	-,055	-,180	-,049	,987	1,014
	Tipo Vetro	120,839	47,550	,016	2,541	,016	,061	,016	1,000	1,000

a. Variabile dipendente: Annual Heating [MJ]

Utilizzando i valori dei coefficienti, elencati in Tabella 4.43, relativi alle variabili prese in considerazione nel sesto modello si ottiene la seguente equazione che permette di stimare i fabbisogni invernali:

$$Q_{inv_{stimato}\ [MJ]} = -11004.034 + 9.961\, x_{loc} - 918.604\, x_{spess\_iso} + 142.54\, x_{orient_{fin.}} + 21.535\, x_{tipo\_edificio} - 86.142\, x_{sup\ \_vetrata} + 120.839\, x_{tipo\_vetro.}$$

Osservando i valori dei coefficienti standardizzati delle variabili indipendenti del modello si può vedere che il fattore principale è la località (GG) e ha proporzionalità diretta con la variabile dipendente fabbisogno, attraverso l'entità e il segno posso capire che variazioni subisce il fabbisogno al variare dei coefficienti.

Facendo l'analisi dei residui e osservando sia *l'istogramma* che il *grafico di normalità P-P* in Figura 4.44 si può constatare che l'ipotesi di normalità è rispettata e il modello si discosta poco dalla linearità, se non fosse rispettata i risultati ottenuti non sarebbero validi perché sarebbe violato il teorema del limite centrale.

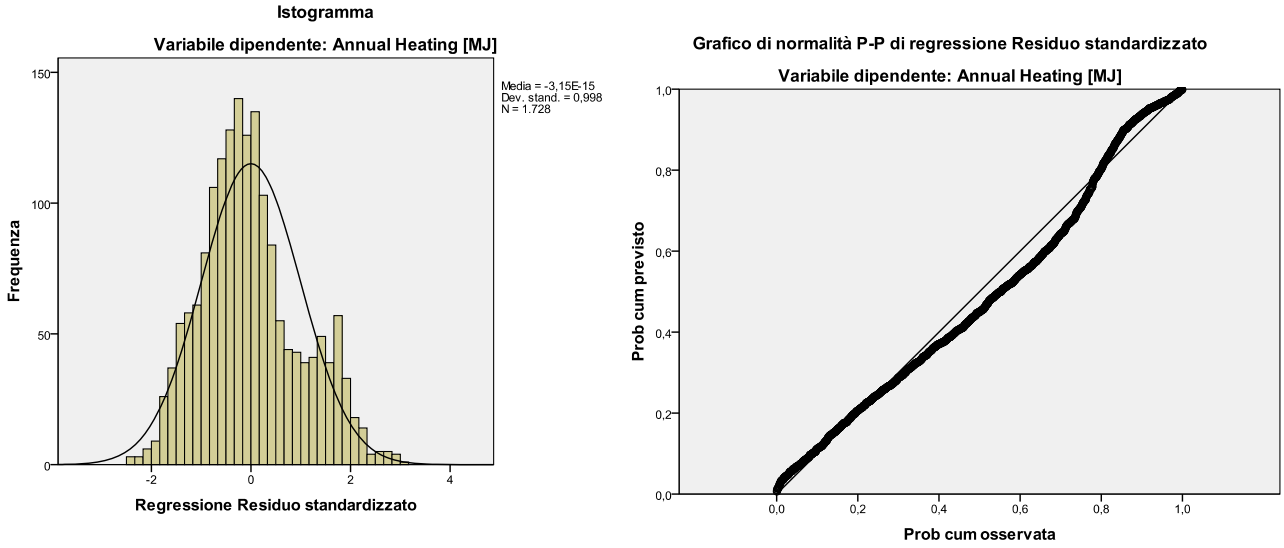


Figura 4.44 – Istogramma e Grafico di normalità P-P dei residui

Secondo modello di regressione multivariata per i fabbisogni invernali

La differenza principale di questo secondo modello rispetto al primo è l'aggiunta della variabile indipendente *Rad Hor* (radiazione incidente sull'orizzontale) perché l'unica variabile che descriveva le condizioni esterne era il valore dei gradi giorno delle località.

Il nuovo modello è riepilogato in Tabella 4.45:

Tabella 4.45 - Riepilogo del modello[h]

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Deviazione standard Errore della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	Sig. Variazione di F	
1	,835[a]	,697	,697	4574,95872	,697	3967,530	1	1726	,000	
2	,949[b]	,901	,901	2618,02227	,204	3545,702	1	1725	,000	
3	,961[c]	,924	,923	2298,91638	,023	513,121	1	1724	,000	
4	,963[d]	,927	,927	2249,28002	,003	77,929	1	1723	,000	
5	,964[e]	,930	,930	2200,19868	,003	78,730	1	1722	,000	
6	,966[f]	,932	,932	2163,49623	,002	59,921	1	1721	,000	
7	,966[g]	,933	,932	2159,88421	,000	6,761	1	1720	,009	,612

a. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno)

b. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Spessore isolante [cm]

c. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Spessore isolante [cm], Orientazione

d. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Spessore isolante [cm], Orientazione, Pianta Edificio

e. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Spessore isolante [cm], Orientazione, Pianta Edificio, Rad Hor

f. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Spessore isolante [cm], Orientazione, Pianta Edificio, Rad Hor, Superfice vetrata[m2]

g. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Spessore isolante [cm], Orientazione, Pianta Edificio, Rad Hor, Superfice vetrata[m2], Tipo Vetro

h. Variabile dipendente: Annual Heating [MJ]

Con l'aggiunta della nuova variabile nel modello si nota un innalzamento del *coefficiente di determinazione* R^2 rispetto al primo modello, ciò ci fa capire che il secondo modello è preferibile al primo perché il valore del coefficiente è più vicino a 1 (valore massimo) e quindi il secondo modello è più affidabile.

In Tabella 4.46 sono elencati i coefficienti assegnati alle variabili incluse nel modello:

Tabella 4.46 - Coefficienti[a]

Modello	Coefficienti non standardizzati	Coefficienti standardizzati	t	Correlazioni	Statistiche di collinearità

		B	Deviazione standard Errore	Beta		Ordine zero	Parziali	Parziali indipendenti	Tolleranza	VIF
1	(Costante)	-3137,576	262,737		-11,942					
	Località (GG)	9,961	,158	,835	62,988	,835	,835	,835	1,000	1,000
2	(Costante)	6048,462	215,417		28,078					
	Località (GG)	9,961	,090	,835	110,071	,835	,936	,835	1,000	1,000
	Spessore isolante [cm]	-918,604	15,427	-,452	-59,546	-,452	-,820	-,452	1,000	1,000
3	(Costante)	2979,887	232,663		12,808					
	Località (GG)	9,961	,079	,835	125,350	,835	,949	,835	1,000	1,000
	Spessore isolante [cm]	-918,604	13,546	-,452	-67,811	-,452	-,853	-,452	1,000	1,000
	Orientazione	139,481	6,157	,151	22,652	,151	,479	,151	1,000	1,000
4	(Costante)	-359,769	441,522		-,815					
	Località (GG)	9,961	,078	,835	128,116	,835	,951	,835	1,000	1,000
	Spessore isolante [cm]	-918,604	13,254	-,452	-69,308	-,452	-,858	-,452	1,000	1,000
	Orientazione	142,874	6,037	,155	23,667	,151	,495	,154	,996	1,004
	Pianta Edificio	23,890	2,706	,058	8,828	,048	,208	,058	,996	1,004
5	(Costante)	32520,251	3730,719		8,717					
	Località (GG)	5,613	,496	,470	11,319	,835	,263	,072	,024	42,515
	Spessore isolante [cm]	-918,604	12,965	-,452	-70,854	-,452	-,863	-,452	1,000	1,000
	Orientazione	142,874	5,905	,155	24,195	,151	,504	,154	,996	1,004

	Pianta Edificio	23,890	2,647	,058	9,025	,048	,213	,058	,996	1,004
	Rad Hor	-4,729	,533	-,369	-8,873	-,834	-,209	-,057	,024	42,515
6	(Costante)	34261,989	3675,379		9,322					
	Località (GG)	5,613	,488	,470	11,511	,835	,267	,072	,024	42,515
	Spessore isolante [cm]	-918,604	12,749	-,452	-72,056	-,452	-,867	-,452	1,000	1,000
	Orientazione	142,540	5,807	,154	24,547	,151	,509	,154	,996	1,004
	Pianta Edificio	21,535	2,621	,052	8,217	,048	,194	,051	,983	1,018
	Rad Hor	-4,729	,524	-,369	-9,024	-,834	-,213	-,057	,024	42,515
	Superficie vetrata[m2]	-86,142	11,128	-,049	-7,741	-,055	-,183	-,049	,987	1,014
7	(Costante)	21875,987	6012,854		3,638					
	Località (GG)	5,613	,487	,470	11,530	,835	,268	,072	,024	42,515
	Spessore isolante [cm]	-918,604	12,727	-,452	-72,176	-,452	-,867	-,452	1,000	1,000
	Orientazione	142,540	5,797	,154	24,588	,151	,510	,154	,996	1,004
	Pianta Edificio	21,535	2,616	,052	8,231	,048	,195	,051	,983	1,018
	Rad Hor	-4,729	,523	-,369	-9,039	-,834	-,213	-,057	,024	42,515
	Superficie vetrata[m2]	-86,142	11,110	-,049	-7,754	-,055	-,184	-,049	,987	1,014
	Tipo Vetro	120,839	46,473	,016	2,600	,016	,063	,016	1,000	1,000

a. Variabile dipendente: Annual Heating [MJ]

Utilizzando i valori dei coefficienti, elencati in Tabella 4.46, relativi alle variabili prese in considerazione nel settimo modello si ottiene la seguente equazione che permette di stimare i fabbisogni invernali:

$$Q_{inv_{stimato}}_{[MJ]} = 21875.987 + 5.613\, x_{loc} - 918.604\, x_{spess\_iso} + 142.54\, x_{orient_{fin}} + 21.535\, x_{tipo\_edificio} - 4.729\, x_{Rad\_Hor} - 86.142\, x_{sup\ \_vetrata} + 120.839\, x_{tipo\_vetro}$$

Osservando i valori dei coefficienti standardizzati delle variabili indipendenti del modello si può vedere che con l'aggiunta della variabile *Rad Hor* è diminuito il coefficiente riferito alla variabile dipendente *località (GG)* perché in questo modello oltre all'influenza della variazione di temperatura esterna, espressa dal valore dei gradi giorno, si tiene in considerazione la radiazione incidente sul piano orizzontale in quella determinata località.

Con l'analisi dei residui e osservando sia *l'istogramma* che il *grafico di normalità P-P* in Figura 4.47 si può constatare che l'ipotesi di normalità è rispettata e questo secondo modello si avvicina di più alla linearità rispetto al primo.

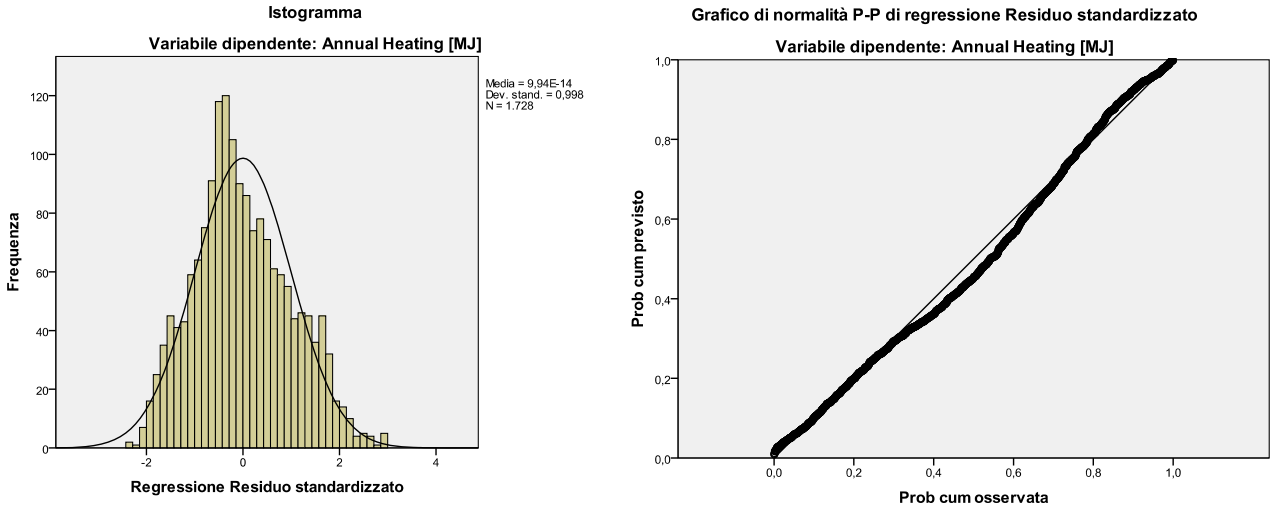


Figura 4.47 – Istogramma e Grafico di normalità P-P dei residui

Terzo modello di regressione multivariata per i fabbisogni invernali

In questo terzo modello si è deciso di normalizzare i fabbisogni invernali rispetto alla variabile indipendente *Località (Gradi Giorno)*.

Dal punto di vista pratico si è diviso il fabbisogno invernale per il valore dei gradi giorno della rispettiva località perché dai due modelli precedenti è emerso che questa variabile è quella che incide in modo più significativo sui fabbisogni invernali.

In Tabella 4.48 troviamo il riepilogo del terzo modello:

Tabella 4.48 - Riepilogo del modello[g]

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
				Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	Sig. Variazione di F	
1	,795[a]	,632	,632	,632	2964,835	1	1726	,000	
2	,863[b]	,745	,745	,113	765,384	1	1725	,000	
3	,914[c]	,836	,835	,090	948,673	1	1724	,000	
4	,922[d]	,850	,850	,014	165,650	1	1723	,000	
5	,926[e]	,858	,858	,008	97,848	1	1722	,000	
6	,927[f]	,860	,859	,002	22,495	1	1721	,000	1,251

a. Predittori: (Costante), Spessore isolante [cm]

b. Predittori: (Costante), Spessore isolante [cm], Rad Hor

c. Predittori: (Costante), Spessore isolante [cm], Rad Hor, Orientazione

d. Predittori: (Costante), Spessore isolante [cm], Rad Hor, Orientazione, Superfice vetrata[m2]

e. Predittori: (Costante), Spessore isolante [cm], Rad Hor, Orientazione, Superfice vetrata[m2], Pianta Edificio

f. Predittori: (Costante), Spessore isolante [cm], Rad Hor, Orientazione, Superfice vetrata[m2], Pianta Edificio, Tipo Vetro

g. Variabile dipendente: Annual Heating [MJ/GG]

Nel terzo modello ho una diminuzione del *coefficiente di determinazione* R^2 perché rispetto agli altri modelli è stata tolta la variabile indipendente *località (GG)* che era la più significativa anche ai fini della "bontà" del modello.

I coefficienti delle variabili del terzo modello sono elencati in Tabella 4.49:

Tabella 4.49 - Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati		Correlazioni			Statistiche di collinearità	
		B	Deviazione standard Errore	Beta	t	Ordine zero	Parziali	Parziali indipendenti	Tolleranza	VIF
1	(Costante)	13,659	,125		109,510					
	Spessore isolante [cm]	-,629	,012	-,795	-54,450	-,795	-,795	-,795	1,000	1,000
2	(Costante)	22,992	,353		65,140					
	Spessore isolante [cm]	-,629	,010	-,795	-65,405	-,795	-,844	-,795	1,000	1,000
	Rad Hor	-,002	,000	-,336	-27,666	-,336	-,554	-,336	1,000	1,000
3	(Costante)	20,613	,294		70,138					
	Spessore isolante [cm]	-,629	,008	-,795	-81,413	-,795	-,891	-,795	1,000	1,000
	Rad Hor	-,002	,000	-,336	-34,436	-,336	-,638	-,336	1,000	1,000
	Orientazione	,108	,004	,301	30,801	,301	,596	,301	1,000	1,000
4	(Costante)	21,963	,300		73,273					
	Spessore isolante [cm]	-,629	,007	-,795	-85,212	-,795	-,899	-,795	1,000	1,000
	Rad Hor	-,002	,000	-,336	-36,043	-,336	-,656	-,336	1,000	1,000
	Orientazione	,108	,003	,301	32,238	,301	,613	,301	1,000	1,000
	Superficie vetrata[m2]	-,082	,006	-,120	-12,871	-,120	-,296	-,120	1,000	1,000
5	(Costante)	19,804	,364		54,364					

	Spessore isolante [cm]	-,629	,007	-,795	-87,574	-,795	-,904	-,795	1,000	1,000
	Rad Hor	-,002	,000	-,336	-37,042	-,336	-,666	-,336	1,000	1,000
	Orientazione	,110	,003	,307	33,697	,301	,630	,306	,996	1,004
	Superfice vetrata[m2]	-,075	,006	-,110	-11,989	-,120	-,278	-,109	,987	1,014
	Pianta Edificio	,015	,001	,091	9,892	,084	,232	,090	,983	1,018
6	(Costante)	7,138	2,695		2,648					
	Spessore isolante [cm]	-,629	,007	-,795	-88,119	-,795	-,905	-,795	1,000	1,000
	Rad Hor	-,002	,000	-,336	-37,273	-,336	-,668	-,336	1,000	1,000
	Orientazione	,110	,003	,307	33,907	,301	,633	,306	,996	1,004
	Superfice vetrata[m2]	-,075	,006	-,110	-12,064	-,120	-,279	-,109	,987	1,014
	Pianta Edificio	,015	,001	,091	9,953	,084	,233	,090	,983	1,018
	Tipo Vetro	,124	,026	,043	4,743	,043	,114	,043	1,000	1,000

a. Variabile dipendente: Annual Heating [MJ/GG]

Il modello che permette di stimare i fabbisogni invernali normalizzati sul valore dei GG della località in cui è situato l'edificio è il seguente:

$$Q_{inv_{stimato}\left[\frac{MJ}{GG}\right]} = 7.138 - 0.629\, x_{spess\_iso} - 0.002\, x_{Rad\_Hor} + 0.11\, x_{orient_{fin}} - 0.075\, x_{sup\_vetrata} + 0.015\, x_{tipo\_edificio} + 0.124\, x_{tipo\_vetro.}$$

Anche in questo caso per verificare che il modello sia lineare e che l'ipotesi di normalità sia rispettata si esegue l'analisi dei residui e osservando sia *l'istogramma* che il *grafico di normalità P-P* in Figura 4.50 si può constatare che l'ipotesi di normalità è rispettata e questo terzo modello è molto più lineare rispetto agli altri due precedenti, pur avendo un *indice di determinazione* più basso.

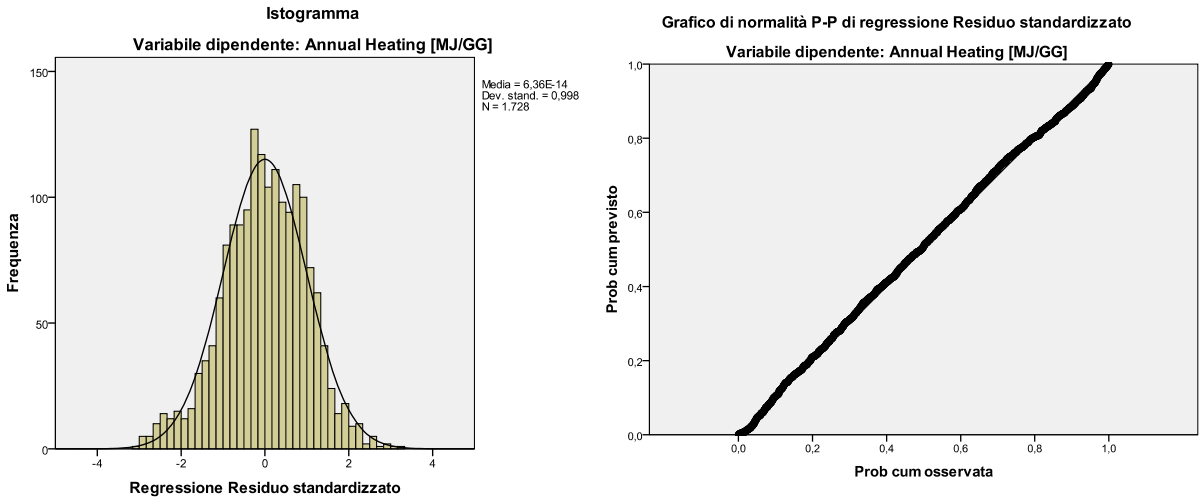


Figura 4.50 – Istogramma e Grafico di normalità P-P dei residui

Analizzando i grafici di regressione parziale dei fabbisogni invernali in relazione alle variabili indipendenti di quest'ultimo modello si può capire in che modo la variazione delle stesse incide nel fabbisogno invernale.

Nei grafici di regressione parziale di Figura 4.51-4.52-4.53-4.54 relativi alle variabili indipendenti *spessore dell'isolante, Rad Hor (radiazione incidente sull'orizzontale), orientazione preferenziale delle superfici vetrate ed estensione delle superfici vetrate* si nota che è confermato l'andamento dei fabbisogni invernali osservato nella statistica descrittiva affrontata nel *Paragrafo 4.2.1*.

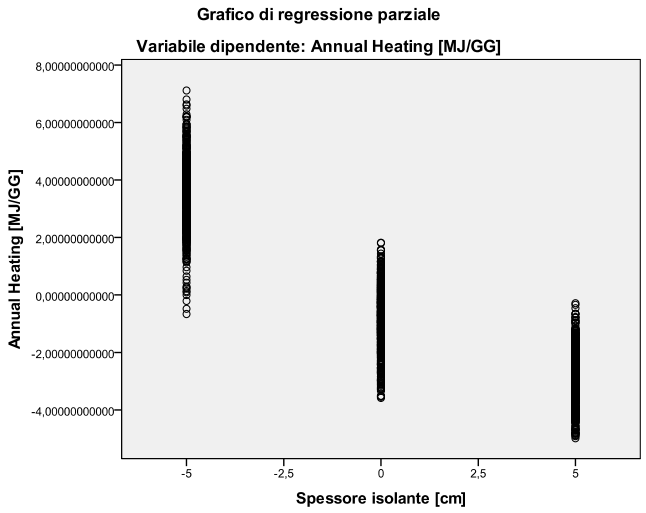


Figura 4.51

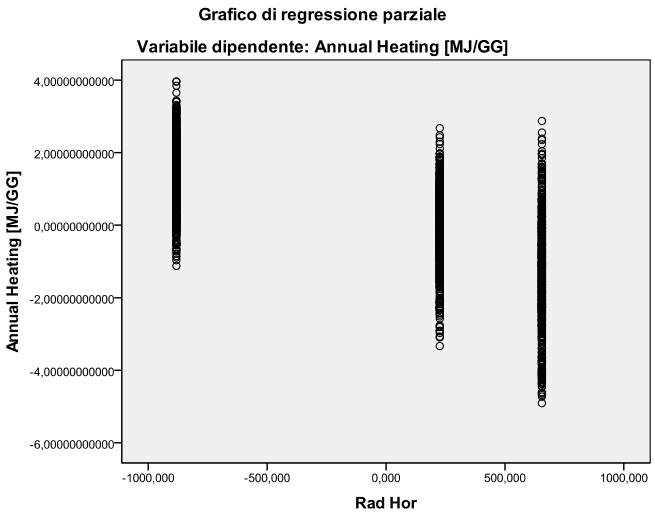


Figura 4.52

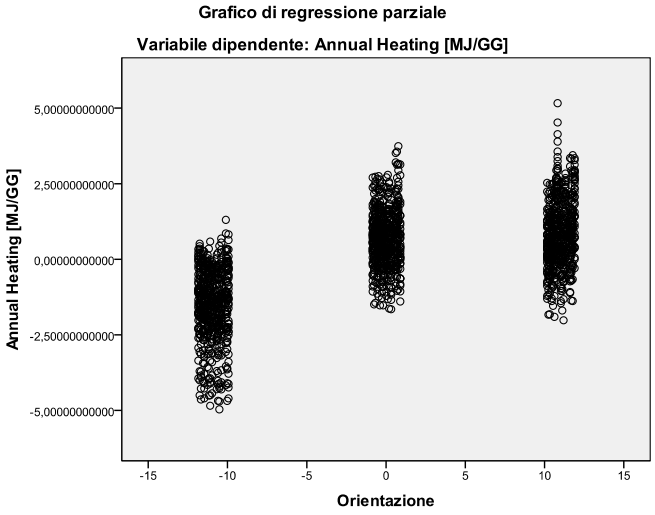


Figura 4.53

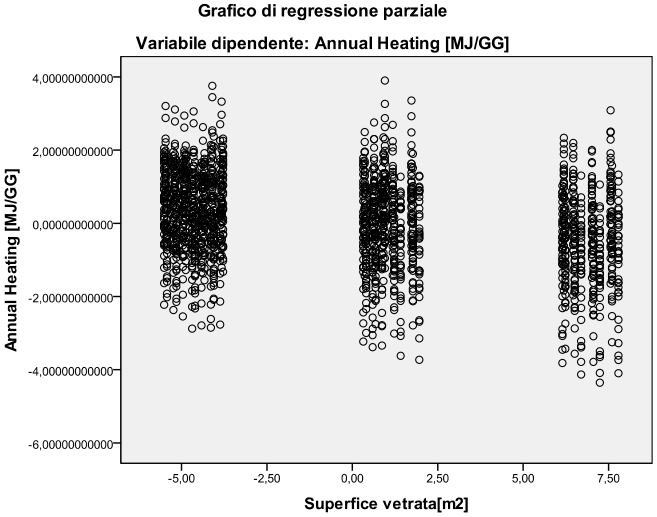


Figura 4.54

4.3.4.2 Analisi fabbisogni estivi

Primo modello di regressione multivariata per i fabbisogni estivi

Il riepilogo del primo modello con le relative variabili è presentato in Tabella 4.55:

Tabella 4.55 - Riepilogo del modello[g]

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Deviazione standard Errore della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	Sig. Variazione di F	
1	,567[a]	,321	,321	3556,34401	,321	816,679	1	1726	,000	
2	,756[b]	,572	,571	2825,11485	,251	1010,118	1	1725	,000	
3	,795[c]	,633	,632	2617,95132	,061	284,807	1	1724	,000	
4	,798[d]	,637	,636	2602,75636	,004	21,188	1	1723	,000	
5	,800[e]	,640	,639	2592,83681	,003	14,209	1	1722	,000	
6	,801[f]	,641	,640	2590,33586	,001	4,327	1	1721	,038	2,571

a. Predittori: (Costante), Superfice vetrata[m2]

b. Predittori: (Costante), Superfice vetrata[m2], Località (gradi giorno)

c. Predittori: (Costante), Superfice vetrata[m2], Località (gradi giorno), Tipo Vetro

d. Predittori: (Costante), Superfice vetrata[m2], Località (gradi giorno), Tipo Vetro, Spessore isolante [cm]

e. Predittori: (Costante), Superfice vetrata[m2], Località (gradi giorno), Tipo Vetro, Spessore isolante [cm], Pianta Edificio

f. Predittori: (Costante), Superfice vetrata[m2], Località (gradi giorno), Tipo Vetro, Spessore isolante [cm], Pianta Edificio, Orientazione

g. Variabile dipendente: Annual Cooling [MJ]

In questo primo modello è stata inserita anche la variabile indipendente Rad Hor (radiazione incidente sul piano orizzontale dell'edificio) che è stata scartata dal software perché non esiste una correlazione proporzionale semplice tra l'irraggiamento della località sul piano orizzontale e il fabbisogno energetico in regime estivo.

Il sesto modello è quello che ha *indice di determinazione* R^2 più alto rispetto agli atri modelli, ma indica che il modello è migliorabile perché non è vicino al valore massimo di R^2 che è 1.

I coefficienti delle variabili di questo modello sono elencati in Tabella 4.56:

Tabella 4.56 - Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati		Correlazioni			Statistiche di collinearità	
		B	Deviazione standard Errore	Beta	t	Ordine zero	Parziali	Parziali indipendenti	Tolleranza	VIF
1	(Costante)	1831,324	309,952		5,908					
	Superfice vetrata[m2]	519,219	18,169	,567	28,578	,567	,567	,567	1,000	1,000
2	(Costante)	6513,652	286,932		22,701					
	Superfice vetrata[m2]	519,219	14,433	,567	35,974	,567	,655	,567	1,000	1,000
	Località (GG)	-3,104	,098	-,501	-31,782	-,501	-,608	-,501	1,000	1,000
3	(Costante)	103952,868	5779,877		17,985					
	Superfice vetrata[m2]	519,219	13,375	,567	38,821	,567	,683	,567	1,000	1,000
	Località (GG)	-3,104	,090	-,501	-34,297	-,501	-,637	-,501	1,000	1,000
	Tipo Vetro	-950,626	56,329	-,246	-16,876	-,246	-,377	-,246	1,000	1,000
4	(Costante)	103246,900	5748,376		17,961					
	Superfice vetrata[m2]	519,219	13,297	,567	39,048	,567	,685	,567	1,000	1,000
	Località (GG)	-3,104	,090	-,501	-34,498	-,501	-,639	-,501	1,000	1,000
	Tipo Vetro	-950,626	56,002	-,246	-16,975	-,246	-,379	-,246	1,000	1,000
	Spessore isolante [cm]	70,597	15,337	,067	4,603	,067	,110	,067	1,000	1,000
5	(Costante)	104957,128	5744,413		18,271					
	Superfice vetrata[m2]	513,394	13,336	,560	38,496	,567	,680	,557	,987	1,014
	Località (GG)	-3,104	,090	-,501	-34,630	-,501	-,641	-,501	1,000	1,000
	Tipo Vetro	-950,626	55,789	-,246	-17,040	-,246	-,380	-,246	1,000	1,000
	Spessore isolante [cm]	70,597	15,278	,067	4,621	,067	,111	,067	1,000	1,000
	Pianta Edificio	-11,815	3,134	-,055	-3,769	-,120	-,090	-,055	,987	1,014
6	(Costante)	104578,405	5741,760		18,214					
	Superfice vetrata[m2]	513,601	13,324	,561	38,548	,567	,681	,557	,987	1,014

Località (GG)	-3,104	,090	-,501	-34,663	-,501	-,641	-,501	1,000	1,000
Tipo Vetro	-950,626	55,735	-,246	-17,056	-,246	-,380	-,246	1,000	1,000
Spessore isolante [cm]	70,597	15,264	,067	4,625	,067	,111	,067	1,000	1,000
Pianta Edificio	-11,397	3,138	-,053	-3,632	-,120	-,087	-,052	,983	1,018
Orientazione	14,461	6,952	,030	2,080	,033	,050	,030	,996	1,004

a. Variabile dipendente: Annual Cooling [MJ]

Sulla base del sesto modello riportato in Tabella 4.56 si può stimare il fabbisogno estivo attraverso la seguente equazione:

$$Q_{est\ stimato\ [MJ]} = 104578.405 + 513.601\, x_{sup\_vetrata} - 3.104\, x_{località} - 950.626\, x_{tipo\_vetro} + 70.597\, x_{spess\_iso} - 11.397\, x_{tipo\_edificio} + 14.461\, x_{orient_{fin}}$$

Osservando i valori dei coefficienti standardizzati delle variabili indipendenti del modello si può vedere che il fattore principale è l'estensione di superficie vetrata che ha proporzionalità diretta con la variabile dipendente fabbisogno estivo, attraverso l'entità e il segno posso capire che variazioni subisce il fabbisogno al variare dei coefficienti.

Facendo l'analisi dei residui e osservando sia *l'istogramma* che il *grafico di normalità P-P* in Figura 4.57 si può constatare che l'ipotesi di normalità è rispettata e il modello non si discosta molto dalla linearità.

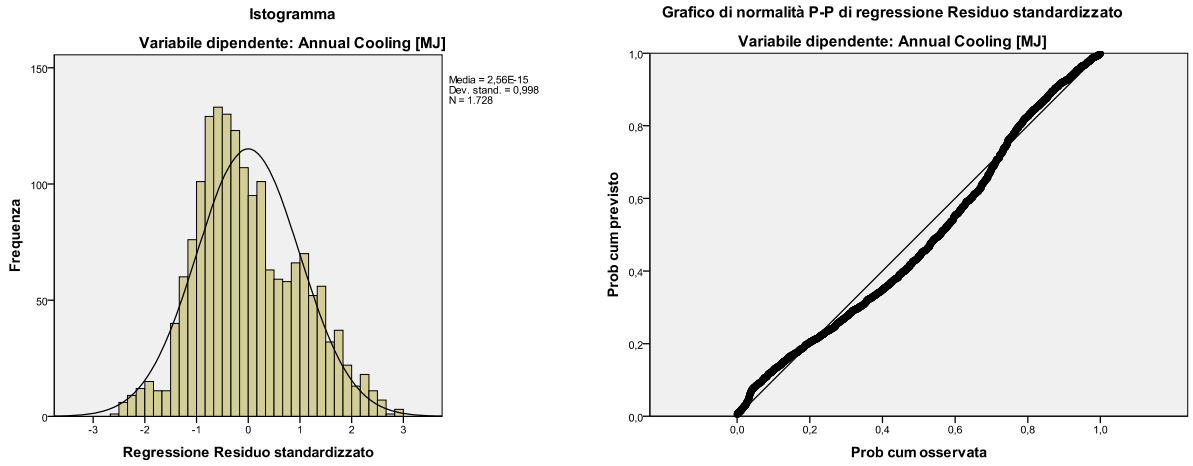


Figura 4.57 – Istogramma e Grafico di normalità P-P dei residui

Secondo modello di regressione multivariata per i fabbisogni estivi

Per tentare di migliorare il modello precedente sia in termini dell' *indice di determinazione* R^2 sia in termini di linearità si è normalizzato il fabbisogno sulla base dei gradi giorno relativi alla località in cui sorge l'edificio.

In Tabella 4.58 è espresso il riepilogo del modello, con le variabili considerate:

Tabella 4.58 - Riepilogo del modello[d]

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
				Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	Sig. Variazione di F	
1	,758[a]	,575	,575	,575	2334,077	1	1726	,000	
2	,811[b]	,658	,658	,083	421,269	1	1725	,000	
3	,822[c]	,676	,675	,017	92,283	1	1724	,000	1,079

a. Predittori: (Costante), Rad Hor

b. Predittori: (Costante), Rad Hor, Superfice vetrata[m2]

c. Predittori: (Costante), Rad Hor, Superfice vetrata[m2], Tipo Vetro

d. Variabile dipendente: Annual Cooling [MJ/GG]

E' possibile vedere che l'aggregazione dei fabbisogni estivi sui gradi giorno della località interessata ha portato ad un lieve innalzamento *dell'indice di determinazione* R^2 e quindi al miglioramento del modello, seppure minimo.

I coefficienti delle variabili di questo secondo modello sono presentati in Tabella 4.59:

Tabella 4.59 - Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati		Correlazioni			Statistiche di collinearità	
		B	Deviazione standard Errore	Beta	t	Ordine zero	Parziali	Parziali indipendenti	Tolleranza	VIF
1	(Costante)	-38,398	1,001		-38,377					
	Rad Hor	,009	,000	,758	48,312	,758	,758	,758	1,000	1,000
2	(Costante)	-45,809	,967		-47,363					
	Rad Hor	,009	,000	,758	53,874	,758	,792	,758	1,000	1,000
	Superficie vetrata[m2]	,452	,022	,289	20,525	,289	,443	,289	1,000	1,000
3	(Costante)	43,187	9,312		4,638					
	Rad Hor	,009	,000	,758	55,281	,758	,800	,758	1,000	1,000
	Superficie vetrata[m2]	,452	,021	,289	21,061	,289	,452	,289	1,000	1,000
	Tipo Vetro	-,868	,090	-,132	-9,606	-,132	-,225	-,132	1,000	1,000

a. Variabile dipendente: Annual Cooling [MJ/GG]

Il modello che permette di stimare il fabbisogno estivo normalizzato sui gradi giorno della località in cui sorge l'edificio è il seguente:

$$Q_{est\,stimato}\left[\frac{MJ}{GG}\right] = 43.187 + 0.009\,x_{Rad\_Hor} + 0.452\,x_{sup\_vetrata} - 0.868\,x_{tipo\_vetro}$$

In questo modello entra in gioco anche la variabile *Rad Hor*, anche se è quella che influenza meno il fabbisogno estivo rispetto alle altre.

Anche in questo caso per verificare che il modello sia lineare e che l'ipotesi di normalità sia rispettata si esegue l'analisi dei residui e osservando sia *l'istogramma* che il *grafico di normalità P-P* in Figura 4.60 si può constatare che l'ipotesi di normalità è rispettata e che anche questo secondo modello è lineare, è stato scelto il primo modello dei fabbisogni estivi perché considera più variabili e quindi è più preciso.

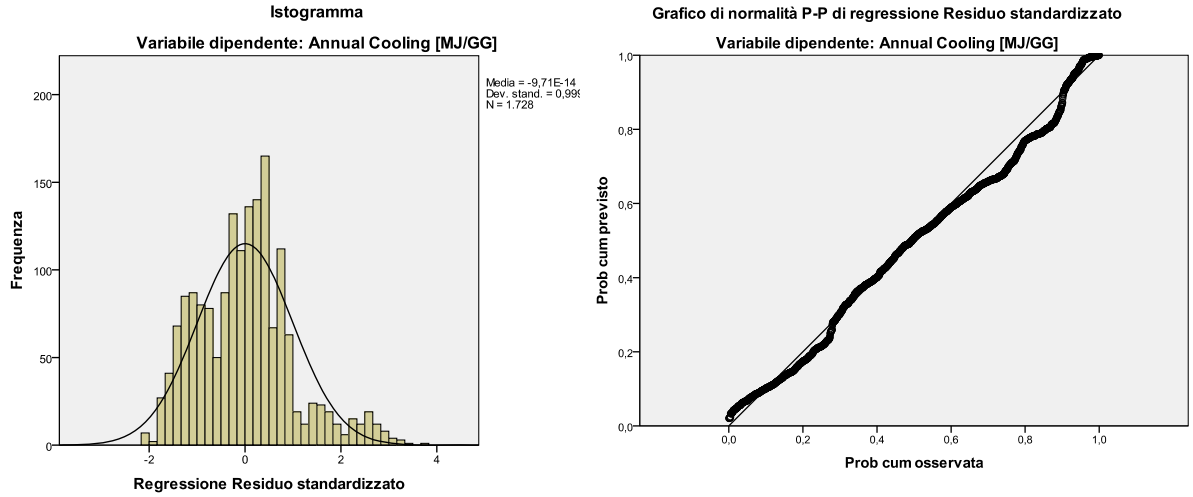


Figura 4.60 – Istogramma e Grafico di normalità P-P dei residui

Analizzando i grafici di regressione parziale dei fabbisogni estivi in relazione alle variabili indipendenti di quest'ultimo modello si può capire in che modo la variazione delle stesse incide nel fabbisogno estivo.

Nei grafici di regressione parziale di Figura 4.61-4.62-4.63 relativi alle variabili indipendenti *Rad Hor (radiazione incidente sull'orizzontale), estensione delle superfici vetrate e tipologia di vetro* si nota che è confermato l'andamento dei fabbisogni estivi osservato nella statistica descrittiva affrontata nel *Paragrafo 4.2.1*.

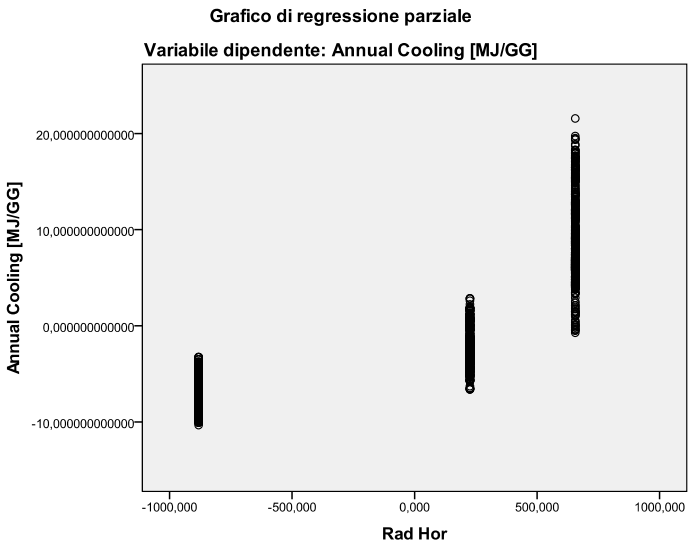


Figura 4.61

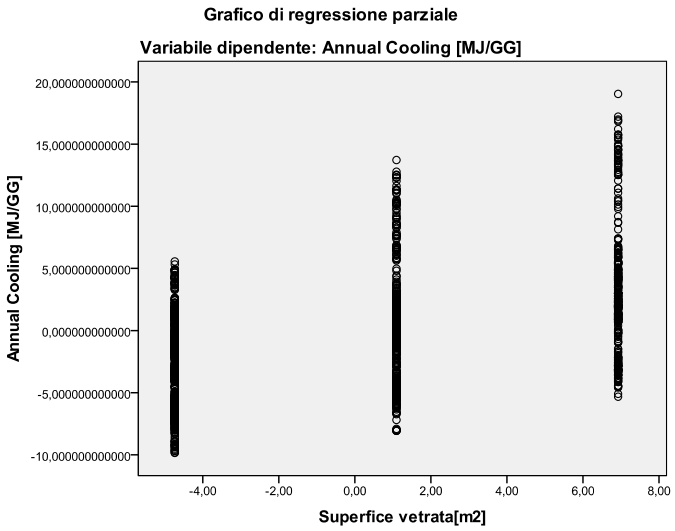


Figura 4.62

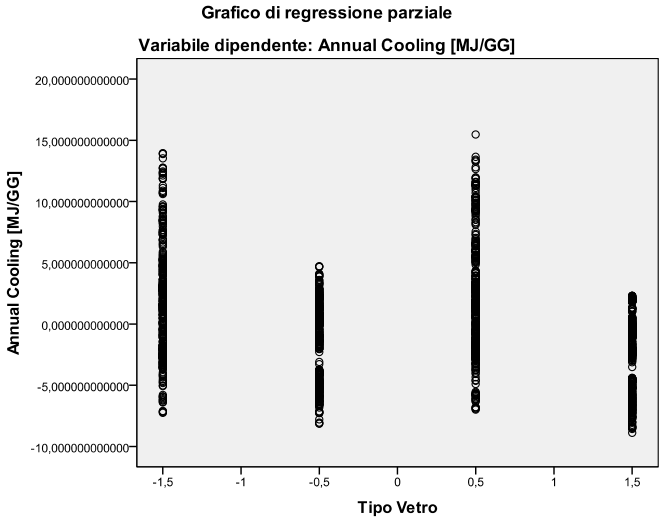


Figura 4.63

4.3.5 Analisi Statistica 2

Nella seconda analisi statistica sono stati ricavati i modelli di regressione lineare multivariata per:

- Fabbisogno invernale [MJ]
- Fabbisogno estivo [MJ]

A differenza dell' "Analisi Statistica 1" le variabili indipendenti di questa analisi sono tutte di tipo numerico e sono:

- *Località*, caratterizzata dal valore dei gradi giorno (GG);
- *Resistenza termica*, è la resistenza termica calcolata per le pareti ed espressa in [W/m^{2}K];
- *Capacità termica,* è la capacità termica delle pareti espressa in [J/ m^{2}K];
- *1/RC,* è il reciproco della costante di tempo *RC* dell'edificio espressa in [1/s];
- *Fattore solare (SHGC),* è il coefficiente di guadagno termico solare del vetro che è stato considerato nell'analisi;
- *Trasmittanza termica U_g,* è la trasmittanza termica del vetro che è stato considerato nell'analisi espressa in [W/m^{2}K];
- *Radiazione entrante nella zona,* è la radiazione totale annuale che entra dalle superfici vetrate nella zona considerata nell'analisi espressa in [MJ];
- *Radiazione sulle superfici opache*, è la radiazione totale annuale che colpisce le superfici opache dell'involucro studiato espressa in [MJ];

Nell'analisi vengono considerate anche altre due variabili indipendenti:

- *Dispersione sulle superfici opache [W*d]*

$$D_{op} = \frac{(\Sigma S_{op})}{R} \times GG$$

- *Dispersione sulle superfici vetrate [W*d]*

$$D_{vetri} = U_g \times S_{vetrata} \times GG$$

4.3.5.1 Analisi dei fabbisogni invernali

Primo modello di regressione multivariata per i fabbisogni invernali

In Tabella 4.64 sono elencati i modelli di regressione lineare elaborati dal software per i fabbisogni invernali di questa seconda analisi statistica:

Tabella 4.64 - Riepilogo del modello[i]

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Deviazione standard Errore della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	Sig. Variazione di F	
1	,835[a]	,697	,697	4574,95872	,697	3967,530	1	1726	,000	
2	,956[b]	,915	,915	2427,63146	,218	4404,847	1	1725	,000	
3	,965[c]	,930	,930	2193,51886	,016	388,866	1	1724	,000	
4	,970[d]	,940	,940	2035,29531	,010	279,466	1	1723	,000	
5	,973[e]	,947	,947	1920,44970	,007	213,237	1	1722	,000	
6	,973[f]	,948	,947	1906,36645	,001	26,536	1	1721	,000	
7	,974[g]	,948	,948	1897,90470	,000	16,380	1	1720	,000	
8	,974[h]	,948	,948	1895,62400	,000	5,141	1	1719	,023	,429

a. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno)

b. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Disp opache

c. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Disp opache, Rad entrante [MJ]

d. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Disp opache, Rad entrante [MJ], Aw/Apav

e. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Disp opache, Rad entrante [MJ], Aw/Apav, Fattore solare

f. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Disp opache, Rad entrante [MJ], Aw/Apav, Fattore solare, Disp vetri

g. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Disp opache, Rad entrante [MJ], Aw/Apav, Fattore solare, Disp vetri, Trasmittanza vetro

h. Predittori: (Costante), Località (gradi giorno), Disp opache, Rad entrante [MJ], Aw/Apav, Fattore solare, Disp vetri, Trasmittanza vetro, Rad su sup opache

i. Variabile dipendente: Annual Heating [MJ]

Dall'analisi degli *indici di determinazione* R^2 dei modelli elaborati al software emerge che i modelli *6-7-8* hanno lo stesso indice di determinazione, viene preferito il modello numero 8 perché ha deviazione standard dell'errore della stima più bassa.

I coefficienti delle variabili incluse nel modello sono presentati in Tabella 4.65:

Tabella 4.65 - Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati		Correlazioni			Statistiche di collinearità	
		B	Deviazione standard Errore	Beta	t	Ordine zero	Parziali	Parziali indipendenti	Tolleranza	VIF
1	(Costante)	-3137,576	262,737		-11,942					
	Località(GG)	9,961	,158	,835	62,988	,835	,835	,835	1,000	1,000
2	(Costante)	-15348,239	230,838		-66,489					
	Località(GG)	9,961	,084	,835	118,704	,835	,944	,835	1,000	1,000
	Disp opache	124,659	1,878	,467	66,369	,467	,848	,467	1,000	1,000
3	(Costante)	-12012,770	268,541		-44,733					
	Località(GG)	9,607	,078	,805	123,292	,835	,948	,783	,947	1,056
	Disp opache	123,012	1,699	,461	72,395	,467	,867	,460	,998	1,002
	Rad entrante	-,106	,005	-,129	-19,720	-,336	-,429	-,125	,945	1,059
4	(Costante)	-13649,636	267,719		-50,985					
	Località(GG)	9,312	,074	,780	125,130	,835	,949	,738	,894	1,119
	Disp opache	124,236	1,578	,465	78,714	,467	,885	,464	,995	1,005
	Rad entrante	-,195	,007	-,236	-26,747	-,336	-,542	-,158	,446	2,244
	Aw/Apav	25369,830	1517,585	,144	16,717	-,055	,374	,099	,469	2,130
5	(Costante)	-18270,146	404,885		-45,124					
	Località(GG)	8,819	,078	,739	113,216	,835	,939	,630	,726	1,377
	Disp opache	124,236	1,489	,465	83,421	,467	,895	,464	,995	1,005
	Rad entrante	-,343	,012	-,416	-28,002	-,336	-,559	-,156	,141	7,116
	Aw/Apav	47763,651	2098,153	,271	22,765	-,055	,481	,127	,219	4,573
	Fatt. solare	12793,203	876,088	,145	14,603	-,085	,332	,081	,315	3,171
6	(Costante)	-17851,321	410,057		-43,534					
	Località(GG)	8,808	,077	,738	113,851	,835	,940	,629	,726	1,378
	Disp opache	124,236	1,478	,465	84,037	,467	,897	,464	,995	1,005
	Rad entrante	-,347	,012	-,420	-28,454	-,336	-,566	-,157	,140	7,139
	Aw/Apav	39813,362	2592,260	,226	15,359	-,055	,347	,085	,141	7,084
	Fatt. solare	11836,432	889,275	,134	13,310	-,085	,306	,074	,302	3,315
	Disp vetri	88,028	17,088	,057	5,151	-,056	,123	,028	,245	4,077
7	(Costante)	-14335,631	959,806		-14,936					
	Località(GG)	8,778	,077	,736	113,480	,835	,939	,624	,719	1,390
	Disp opache	124,236	1,472	,465	84,412	,467	,898	,464	,995	1,005
	Rad entrante	-,356	,012	-,430	-28,846	-,336	-,571	-,159	,136	7,368

	Aw/Apav	19991,869	5535,878	,113	3,611	-,055	,087	,020	,031	32,597
	Fatt. solare	12642,509	907,454	,143	13,932	-,085	,318	,077	,287	3,483
	Disp vetri	307,497	56,833	,201	5,411	-,056	,129	,030	,022	45,500
	Trasm. vetro	-3952,802	976,662	-,083	-4,047	-,019	-,097	-,022	,073	13,790
8	(Costante)	-11738,367	1493,686		-7,859					
	Località(GG)	8,454	,163	,708	51,984	,835	,782	,285	,162	6,160
	Disp opache	124,583	1,478	,466	84,293	,467	,897	,463	,985	1,016
	Rad entrante	-,361	,013	-,437	-28,796	-,336	-,570	-,158	,131	7,634
	Aw/Apav	19287,676	5537,941	,109	3,483	-,055	,084	,019	,031	32,700
	Fatt. solare	12956,372	916,872	,146	14,131	-,085	,323	,078	,281	3,564
	Disp vetri	312,019	56,799	,204	5,493	-,056	,131	,030	,022	45,556
	Trasm. vetro	-4026,942	976,037	-,084	-4,126	-,019	-,099	-,023	,072	13,806
	Rad su sup opache	-,002	,001	-,029	-2,267	-,692	-,055	-,012	,180	5,557

a. Variabile dipendente: Annual Heating [MJ]

Utilizzando i coefficienti selle variabili stimati nell'ottavo modello si ottiene la seguente equazione che serve a stimare i fabbisogni invernali:

$$Q_{inv_{stimato}}{}_{[MJ]} = -11738.367 + 8.454\, x_{località} + 124.583\, x_{Disp\ op} - 0.361\, x_{Rad\ entr} + 19287.676\, x_{Awf Ap} + 12956.372\, x_{VMGC} + 312.019\, x_{Disp\_vetro} - 4026.942\, x_{Ug\ vetro} - 0.002\, x_{Rad\_op}$$

Fattore solare e trasmittanza termica del vetro hanno un segno contrario alle aspettative, (il fattore solare dovrebbe essere negativo e la trasmittanza termica del vetro positiva) tuttavia quando queste grandezze sono considerate assieme ad altre (nella radiazione entrante e nelle dispersioni dei vetri) hanno il segno corretto. Possiamo dire che non hanno un significato fisico di bilancio termico ma semplicemente "attenuano" rispettivamente l'effetto della variabile radiazione entrante e dispersioni dei vetri.

Per verificare che il modello sia lineare e che l'ipotesi di normalità sia rispettata si esegue l'analisi dei residui e osservando sia *l'istogramma* che il *grafico di normalità P-P* in Figura 4.66 si può constatare che l'ipotesi di normalità è rispettata e che il primo modello è lineare infatti si discosta poco dalla retta di perfetta linearità del modello.

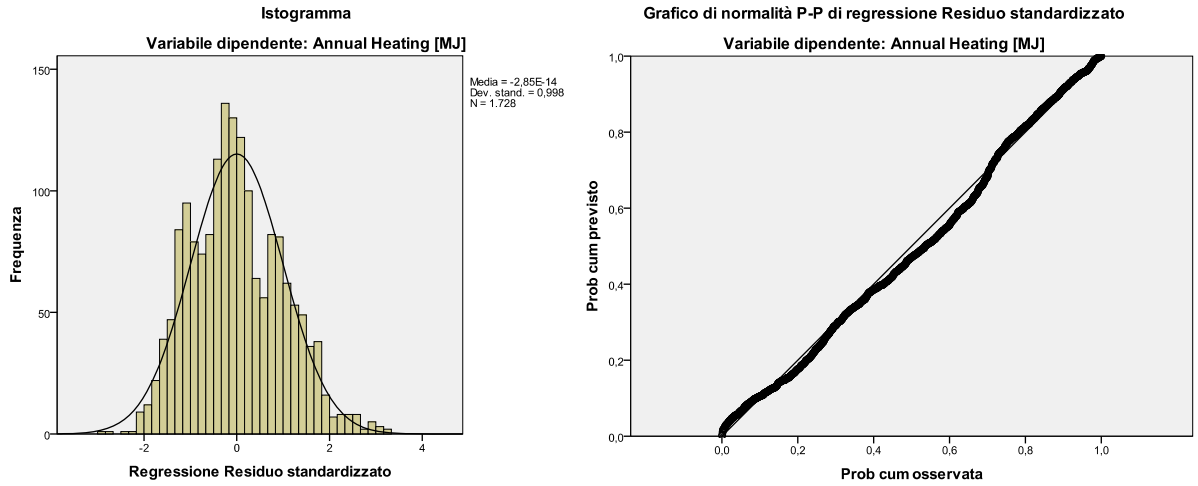


Figura 4.66 – Istogramma e Grafico di normalità P-P dei residui

Secondo modello di regressione multivariata per i fabbisogni invernali

Nel secondo modello di regressione multivariata per i fabbisogni invernali si è deciso di inglobare la variabile *località (GG)* nelle variabili *dispersione vetri* e *dispersione superfici opache* ottenendo così la potenza termica in [W*d] dissipata attraverso le superfici vetrate e opache.

Tabella 4.67 - Riepilogo del modello[l]

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Deviazione standard Errore della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	Sig. Variazione di F	
1	,969[a]	,938	,938	2067,93067	,938	26140,605	1	1726	,000	
2	,978[b]	,957	,957	1725,32802	,019	754,530	1	1725	,000	
3	,986[c]	,972	,972	1388,94902	,015	937,704	1	1724	,000	
4	,988[d]	,976	,976	1294,28347	,004	262,414	1	1723	,000	
5	,991[e]	,982	,982	1126,28059	,006	553,364	1	1722	,000	
6	,991[f]	,982	,982	1117,07824	,000	29,488	1	1721	,000	
7	,991[g]	,982	,982	1107,32743	,000	31,443	1	1720	,000	
8	,991[h]	,983	,983	1089,90316	,001	56,435	1	1719	,000	
9	,991[i]	,983	,983	1087,58304	,000	8,342	1	1718	,004	
10	,992[j]	,983	,983	1074,32269	,000	43,672	1	1717	,000	
11	,992[k]	,983	,983	1074,11067	,000	,322	1	1717	,571	1,421

Tabella 4.67 - Riepilogo del modello[l]

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Deviazione standard Errore della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	Sig. Variazione di F	
1	,969[a]	,938	,938	2067,93067	,938	26140,605	1	1726	,000	
2	,978[b]	,957	,957	1725,32802	,019	754,530	1	1725	,000	
3	,986[c]	,972	,972	1388,94902	,015	937,704	1	1724	,000	
4	,988[d]	,976	,976	1294,28347	,004	262,414	1	1723	,000	
5	,991[e]	,982	,982	1126,28059	,006	553,364	1	1722	,000	
6	,991[f]	,982	,982	1117,07824	,000	29,488	1	1721	,000	
7	,991[g]	,982	,982	1107,32743	,000	31,443	1	1720	,000	
8	,991[h]	,983	,983	1089,90316	,001	56,435	1	1719	,000	
9	,991[i]	,983	,983	1087,58304	,000	8,342	1	1718	,004	
10	,992[j]	,983	,983	1074,32269	,000	43,672	1	1717	,000	
11	,992[k]	,983	,983	1074,11067	,000	,322	1	1717	,571	1,421

a. Predittori: (Cost), Disp opache W

b. Predittori: (Cost), Disp opache W, Rad entrante [MJ]

c. Predittori: (Cost), Disp opache W, Rad entrante [MJ], Disp vetri W

d. Predittori: (Cost), Disp opache W, Rad entrante [MJ], Disp vetri W, Aw/Apav

e. Predittori: (Cost), Disp opache W, Rad entrante [MJ], Disp vetri W, Aw/Apav, Fat solare

f. Predittori: (Cost), Disp opache W, Rad entrante [MJ], Disp vetri W, Aw/Apav, Fatt solare, Rad su sup opache

g. Predittori: (Cost), Disp opache W, Rad entrante [MJ], Disp vetri W, Aw/Apav, Fatt solare, Rad su ope, Disp vetri

h. Predittori: (Cost), Disp opache W, Rad entrante [MJ], Disp vetri W, Aw/Apav, Fat solare, Rad su op, Disp vetri, Trasm vetro

i. Predittori: (Cost), Disp opache W, Rad entrante [MJ], Disp vetri W, Aw/Apav, Fatt solare, Rad sup op, Disp vetri, Trasm vetro, Disp opache

j. Predittori: (Cost), Disp opache W, Rad entrante [MJ], Disp vetri W, Aw/Apav, Fatt solare, Rad sup op, Disp vetri, Trasm vetro, Disp opache, 1/(RC)

k. Predittori: (Cost), Disp opache W, Rad entrante [MJ], Aw/Apav, Fat solare, Rad sup op, Disp vetri, Trasm vetro, Disp opache, 1/(RC)

l. Variabile dipendente: Annual Heating [MJ]

In Figura 4.67 sono elencati i modelli di regressione lineare che prendono in considerazione le nuove variabili.

Si nota che *l'indice di determinazione* R^2 dei modelli è nettamente superiore a quello dei modelli precedenti perché si sono messi in relazione i *gradi giorno* (fabbisogno termico dovuto alle variazioni esterne di temperatura) con le *dispersioni delle superfici opache e delle superfici vetrate.*

I coefficienti stimati per le variabili del modello sono contenuti in Tabella 4.68:

Tabella 4.68 - Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati	t	Correlazioni			Statistiche di collinearità	
		B	Deviazione standard Errore	Beta		Ordine zero	Parziali	Parziali indipendenti	Tolleranza	VIF
1	(Cost)	-2006,366	99,307		-20,204					
	Dispop W	,094	,001	,969	161,681	,969	,969	,969	1,000	1,000
2	(Cost)	1288,281	145,777		8,837					
	Disp op W	,091	,000	,939	183,795	,969	,975	,919	,957	1,045
	Rad entr	-,116	,004	-,140	-27,469	-,336	-,552	-,137	,957	1,045
3	(Cost)	1826,026	118,662		15,388					
	Dispop W	,080	,001	,825	148,195	,969	,963	,596	,523	1,912
	Rad entr	-,167	,004	-,203	-44,151	-,336	-,728	-,178	,769	1,300
	Dispvet W	,100	,003	,171	30,622	,616	,594	,123	,519	1,926
4	(Cost)	444,299	139,650		3,182					
	Dispop W	,082	,001	,845	158,298	,969	,967	,594	,493	2,028
	Rad entr	-,214	,005	-,259	-47,031	-,336	-,750	-,176	,465	2,150
	Dispvet W	,072	,004	,123	20,509	,616	,443	,077	,392	2,553
	Aw/Apav	17696,626	1092,439	,100	16,199	-,055	,364	,061	,366	2,730
5	(Cost)	-4789,230	253,505		-18,892					
	Dispop W	,082	,000	,845	181,890	,969	,975	,593	,493	2,028

	Rad entr	-,352	,007	-,427	-49,606	-,336	-,767	-,162	,144	6,952
	Dispvet W	,043	,003	,073	12,970	,616	,298	,042	,336	2,975
	Aw/Apa v	42937,249	1433,531	,243	29,952	-,055	,585	,098	,161	6,207
	Fatt sol	12486,663	530,812	,141	23,524	-,085	,493	,077	,296	3,384
6	(Cost)	-2463,312	496,668		-4,960					
	Dispop W	,081	,000	,837	173,300	,969	,973	,561	,449	2,229
	Rad entr	-,353	,007	-,428	-50,139	-,336	-,770	-,162	,144	6,957
	Dispvet W	,030	,004	,051	7,445	,616	,177	,024	,222	4,514
	Aw/Apa v	43737,961	1429,444	,248	30,598	-,055	,594	,099	,159	6,274
	Fatt sol	12800,267	529,633	,145	24,168	-,085	,503	,078	,292	3,425
	Rad op	-,002	,000	-,031	-5,430	-,692	-,130	-,018	,319	3,133
7	(Cost)	-1504,714	521,168		-2,887					
	Dispop W	,082	,000	,844	171,365	,969	,972	,550	,425	2,355
	Rad entr	-,365	,007	-,441	-50,188	-,336	-,771	-,161	,133	7,518
	Dispvet W	,012	,005	,021	2,389	,616	,058	,008	,136	7,368
	Aw/Apa v	40656,713	1519,783	,231	26,752	-,055	,542	,086	,139	7,217
	Fatt sol	12871,992	525,166	,146	24,510	-,085	,509	,079	,292	3,427
	Rad op	-,004	,000	-,046	-7,308	-,692	-,174	-,023	,265	3,780
	Disp vetri	71,097	12,679	,046	5,607	-,056	,134	,018	,150	6,653
8	(Cost)	2276,873	718,702		3,168					
	Dispop W	,082	,000	,843	174,055	,969	,973	,550	,425	2,356
	Rad entr	-,374	,007	-,453	-51,508	-,336	-,779	-,163	,129	7,772

	Dispvet W	,010	,005	,016	1,902	,616	,046	,006	,135	7,404
	Aw/Apa v	19537,859	3184,439	,111	6,135	-,055	,146	,019	,031	32,707
	Fatt sol	13760,896	530,273	,156	25,951	-,085	,531	,082	,277	3,606
	Rad op	-,004	,000	-,047	-7,610	-,692	-,181	-,024	,264	3,783
	Disp vetri	309,208	34,064	,202	9,077	-,056	,214	,029	,020	49,567
	Tras vetro	-4216,984	561,343	-,088	-7,512	-,019	-,178	-,024	,072	13,814
9	(Cost)	2709,999	732,683		3,699					
	Dispop W	,080	,001	,820	87,264	,969	,903	,275	,112	8,899
	Rad entr	-,376	,007	-,455	-51,685	-,336	-,780	-,163	,128	7,821
	Dispvet W	,017	,006	,029	3,018	,616	,073	,010	,107	9,376
	Aw/Apa v	19420,012	3177,922	,110	6,111	-,055	,146	,019	,031	32,713
	Fatt sol	13859,019	530,233	,157	26,138	-,085	,533	,082	,276	3,621
	Rad op	-,004	,001	-,055	-8,142	-,692	-,193	-,026	,220	4,536
	Disp vetri	299,359	34,163	,195	8,763	-,056	,207	,028	,020	50,066
	Tras vetro	-4240,162	560,206	-,089	-7,569	-,019	-,180	-,024	,072	13,816
	Disp op	4,752	1,645	,018	2,888	,467	,070	,009	,262	3,823
10	(Cost)	5332,885	825,433		6,461					
	Dispop W	,077	,001	,793	78,112	,969	,883	,243	,094	10,641
	Rad entr	-,384	,007	-,465	-52,704	-,336	-,786	-,164	,125	8,029
	Dispvet W	,003	,006	,006	,567	,616	,014	,002	,094	10,664
	Aw/Apa v	20993,141	3148,188	,119	6,668	-,055	,159	,021	,030	32,901
	Fatt sol	14316,630	528,326	,162	27,098	-,085	,547	,084	,271	3,685
	Rad op	-,008	,001	-,100	-10,482	-,692	-,245	-,033	,107	9,355

	Disp vetri	326,531	33,996	,213	9,605	-,056	,226	,030	,020	50,809
	Tras vetro	-4348,258	553,617	-,091	-7,854	-,019	-,186	-,024	,072	13,828
	Disp op	69,490	9,930	,260	6,998	,467	,167	,022	,007	142,721
	1/(RC)	-2,668E9	4,038E8	-,227	-6,608	,461	-,157	-,021	,008	121,729
1	(Cost)	5491,762	776,339		7,074					
1	Dispop W	,077	,001	,795	83,515	,969	,896	,260	,107	9,360
	Rad entr	-,385	,007	-,466	-56,167	-,336	-,805	-,175	,140	7,123
	Aw/Apav	21073,749	3144,360	,119	6,702	-,055	,160	,021	,030	32,834
	Fatt sol	14398,701	508,041	,163	28,342	-,085	,564	,088	,293	3,408
	Rad op	-,008	,001	-,102	-12,298	-,692	-,284	-,038	,140	7,160
	Disp vetri	332,797	32,146	,217	10,353	-,056	,242	,032	,022	45,449
	Trasm vetro	-4367,644	552,453	-,091	-7,906	-,019	-,187	-,025	,073	13,776
	Disp op	71,026	9,552	,266	7,436	,467	,177	,023	,008	132,117
	1/(RC)	-2,748E9	3,785E8	-,234	-7,260	,461	-,173	-,023	,009	107,019

a. Variabile dipendente: Annual Heating [MJ]

Dai coefficienti contenuti in tabella si può ottenere il seguente modello di stima dei fabbisogni invernali:

$$Q_{inv_{[MJ]}^{stimato}} = 5491.762 + 0.077\, x_{Disp\_op[W]} - 0.385\, x_{Rad\_entr} + 21073.749\, x_{Aw/Ap} + 14398.701\, x_{SHGC} - 0.008\, x_{Rad\_op} + 332.797\, x_{Disp\_vetro} - 4367.644\, x_{Ug\ vetro} + 71.026\, x_{Disp\_op} - 2.748 \times 10^{9}\, x_{1/Rc}$$

Dall'analisi dei residui e osservando sia *l'istogramma* che il *grafico di normalità P-P* in Figura 4.69 si può constatare che l'ipotesi di normalità è rispettata e che questo modello è un po' meno lineare del primo anche se l'indice di determinazione maggiore ci dice che è un modello migliore.

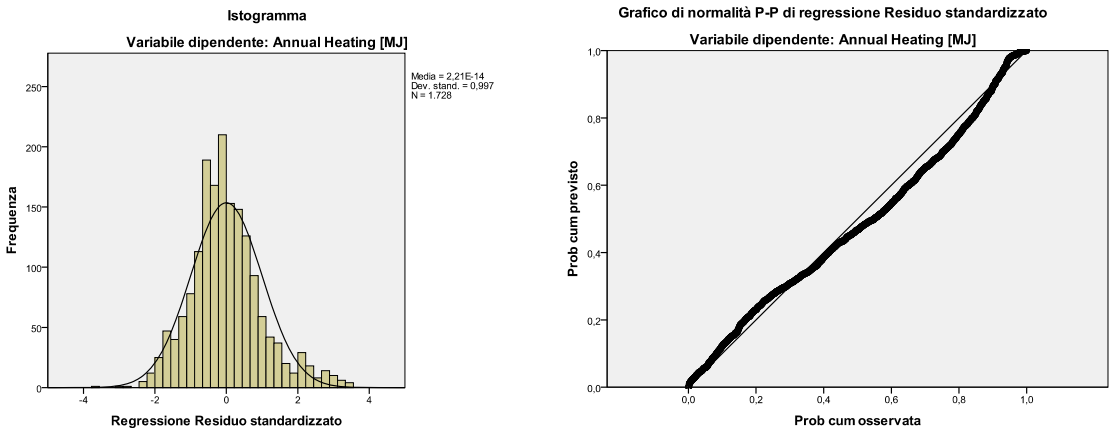


Figura 4.69 – Istogramma e Grafico di normalità P-P dei residui

Analizzando i grafici di regressione parziale dei fabbisogni invernali in relazione alle variabili indipendenti di quest'ultimo modello si può capire in che modo la variazione delle stesse incide nel fabbisogno invernale.

Nei grafici di regressione parziale di Figura 4.70-4.71 relativi alle variabili indipendenti *Dispersione sulle superfici opache [W], Radiazione entrante [MJ] si* nota che è confermato l'andamento dei fabbisogni invernali osservato nella statistica descrittiva affrontata nel *Paragrafo 4.2.2*.

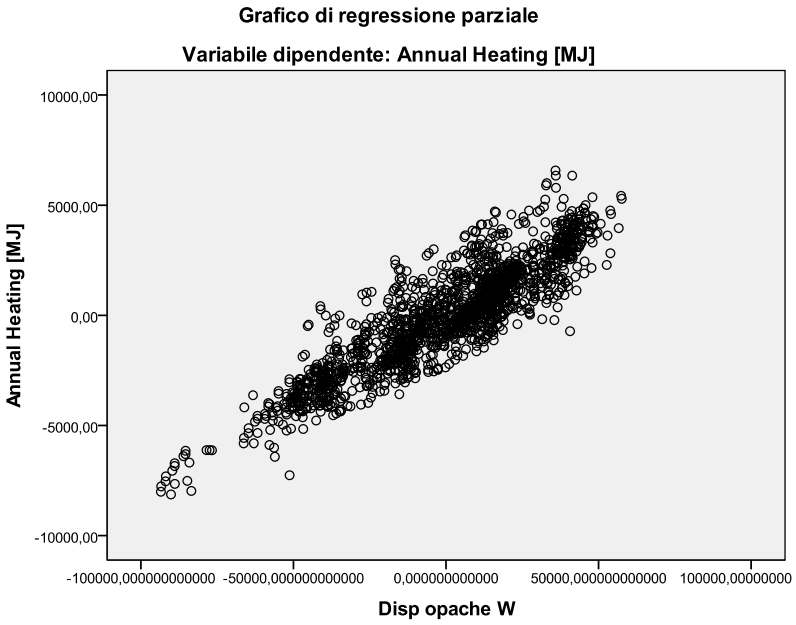


Figura 4.70

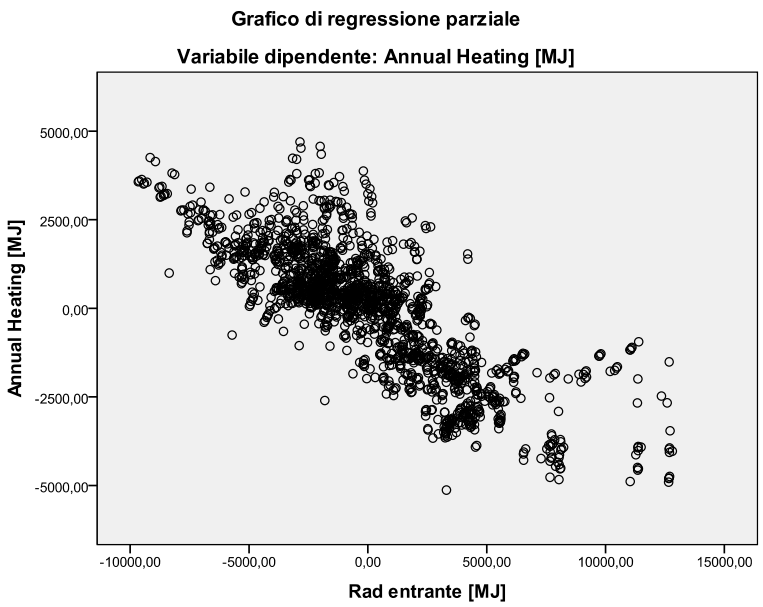


Figura 4.71

4.3.5.2 Analisi dei fabbisogni estivi

Primo modello di regressione multivariata per i fabbisogni estivi

In Tabella 3.72 sono elencati i modelli di regressione lineare elaborati dal software per i fabbisogni estivi di questa seconda analisi statistica:

Tabella 3.72 - Riepilogo del modello[j]

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Deviazione standard Errore della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	Sig. Variazione di F	
1	,794[a]	,630	,630	2624,62419	,630	2942,365	1	1726	,000	
2	,859[b]	,737	,737	2214,18779	,107	700,192	1	1725	,000	
3	,876[c]	,767	,767	2083,62529	,030	223,954	1	1724	,000	
4	,895[d]	,801	,800	1928,54363	,033	289,415	1	1723	,000	
5	,908[e]	,824	,823	1814,79329	,023	223,763	1	1722	,000	
6	,908[f]	,824	,823	1814,46908	,000	,384	1	1722	,535	
7	,910[g]	,828	,828	1790,41990	,005	47,598	1	1722	,000	
8	,910[h]	,829	,828	1787,94994	,001	5,761	1	1721	,016	
9	,911[i]	,830	,829	1782,62327	,001	11,300	1	1720	,001	1,448

a. Predittori: (Cost), Rad entrante [MJ]

b. Predittori: (Cost), Rad entrante [MJ], Località (GG)

c. Predittori: (Cost), Rad entrante [MJ], Località (GG), Disp vetri

d. Predittori: (Cost), Rad entrante [MJ], Località (GG), Disp vetri, Fattore solare

e. Predittori: (Cost), Rad entrante [MJ], Località (GG), Disp vetri, Fattore solare, Trasmittanza vetro

f. Predittori: (Cost), Località (GG), Disp vetri, Fattore solare, Trasmittanza vetro

g. Predittori:(Cost), Località (GG), Disp vetri, Fattore solare, Trasmittanza vetro, 1/(RC)

h. Predittori: (Cost), Località (GG), Disp vetri, Fattore solare, Trasmittanza vetro, 1/(RC), Rad su sup opache

i. Predittori: (Cost), Località (GG), Disp vetri, Fattore solare, Trasmittanza vetro, 1/(RC), Rad su sup opache, Disp opache

j. Variabile dipendente: Annual Cooling [MJ]

Il modello scelto è il numero *9* perché ha *indice di determinazione* R^2 maggiore e quindi è un modello più affidabile, come possiamo vedere nei commenti di modelli ottenuti al software la variabile *Rad entrante [MJ]* è stata la più significativa fino al quinto modello, poi è stata sostituita dalla variabile *località (GG).*

In Tabella 4.73 sono elencati i coefficienti delle variabili del modello:

Tabella 4.73 - Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati		Correlazioni			Statistiche di collinearità	
		B	Deviazione standard Errore	Beta	t	Ordzero	Parziali	Parziali indipendenti	Tolleranza	VIF
1	(Cost)	1899,441	168,010		11,306					
	Radentr	,341	,006	,794	54,244	,794	,794	,794	1,000	1,000
2	(Cost)	5861,256	206,170		28,429					
	Radentr	,307	,005	,717	56,481	,794	,806	,697	,947	1,056
	Località (GG)	-2,081	,079	-,336	-26,461	-,501	-,537	-,327	,947	1,056
3	(Cost)	5146,264	199,809		25,756					
	Radentr	,220	,008	,514	28,448	,794	,565	,331	,414	2,416
	Località (GG)	-2,370	,076	-,382	-30,989	-,501	-,598	-,360	,886	1,128
	Disp vetri	209,399	13,992	,263	14,965	,638	,339	,174	,437	2,288
4	(Cost)	2043,049	259,761		7,865					
	Radentr	,125	,009	,292	13,793	,794	,315	,148	,258	3,882
	Località (GG)	-2,687	,073	-,433	-36,703	-,501	-,662	-,395	,829	1,206
	Disp vetri	294,659	13,887	,370	21,218	,638	,455	,228	,380	2,631
	Fatt sol	10946,555	643,453	,238	17,012	,485	,379	,183	,590	1,696

5	(Cost)	4315,324	287,794		14,995					
	Radentr	,007	,012	,017	,620	,794	,015	,006	,139	7,193
	Località (GG)	-3,080	,074	-,497	-41,773	-,501	-,709	-,423	,724	1,381
	Dispvetri	527,940	20,346	,663	25,948	,638	,530	,263	,157	6,378
	Fatt sol	20104,375	861,062	,438	23,348	,485	,490	,236	,292	3,430
	Trasmvetro	-6510,904	435,259	-,262	-14,959	,282	-,339	-,151	,334	2,995
6	(Cost)	4351,552	281,750		15,445					
	Località (GG)	-3,104	,063	-,501	-49,485	-,501	-,766	-,501	1,000	1,000
	Disp vetri	539,107	9,466	,677	56,951	,638	,808	,576	,724	1,381
	Fatt sol	20531,393	516,744	,447	39,732	,485	,691	,402	,809	1,236
	Trasmvetro	-6693,997	319,710	-,269	-20,938	,282	-,450	-,212	,619	1,617
7	(Cost)	5252,893	307,182		17,100					
	Località (GG)	-3,104	,062	-,501	-50,150	-,501	-,770	-,501	1,000	1,000
	Disp vetri	539,107	9,341	,677	57,716	,638	,812	,576	,724	1,381
	Fatt sol	20531,393	509,895	,447	40,266	,485	,696	,402	,809	1,236
	Trasmvetro	-6693,997	315,472	-,269	-21,219	,282	-,455	-,212	,619	1,617
	1/(RC)	-4,208E8	6,099E7	-,069	-6,899	-,069	-,164	-,069	1,000	1,000
8	(Cost)	2832,912	1053,871		2,688					
	Località (GG)	-2,805	,139	-,453	-20,212	-,501	-,438	-,202	,198	5,044
	Disp vetri	549,722	10,323	,691	53,252	,638	,789	,531	,591	1,692
	Fatt sol	20531,393	509,192	,447	40,322	,485	,697	,402	,809	1,236
	Trasmvetro	-6868,051	323,275	-,276	-21,245	,282	-,456	-,212	,587	1,702
	1/(RC)	-4,208E8	6,090E7	-,069	-6,909	-,069	-,164	-,069	1,000	1,000
	Rad op	,002	,001	,055	2,400	,330	,058	,024	,190	5,268
9	(Cost)	-1177,100	1589,657		-,740					
	Località (GG)	-2,278	,209	-,368	-10,892	-,501	-,254	-,108	,087	11,521
	Disp vetri	542,782	10,497	,682	51,707	,638	,780	,514	,568	1,760
	Fatt sol	20531,393	507,675	,447	40,442	,485	,698	,402	,809	1,236
	Trasmvetro	-6754,260	324,085	-,272	-20,841	,282	-,449	-,207	,581	1,721
	1/(RC)	2,077E9	7,455E8	,340	2,786	-,069	,067	,028	,007	150,713
	Rad op	,006	,001	,152	4,130	,330	,099	,041	,073	13,708
	Disp op	-57,348	17,060	-,413	-3,362	-,107	-,081	-,033	,007	152,991

a. Variabile dipendente: Annual Cooling [MJ]

Prendendo in considerazione i coefficienti stimati dal nono modello in tabella si può stimare il fabbisogno estivo come:

$$Q_{est\ stimato}_{[MJ]} = -11771 - 2.278\,x_{loc\ (GG)} + 342.782\,x_{Disp\_vetro} - 20331.343\,x_{SHGC} - 6734.26\,x_{Ugvetro} + 2.077 \times 10^{6}\,x_{1/RC} + 3.006\,x_{Rad\_op} - 37.349\,x_{Disp\_op}$$

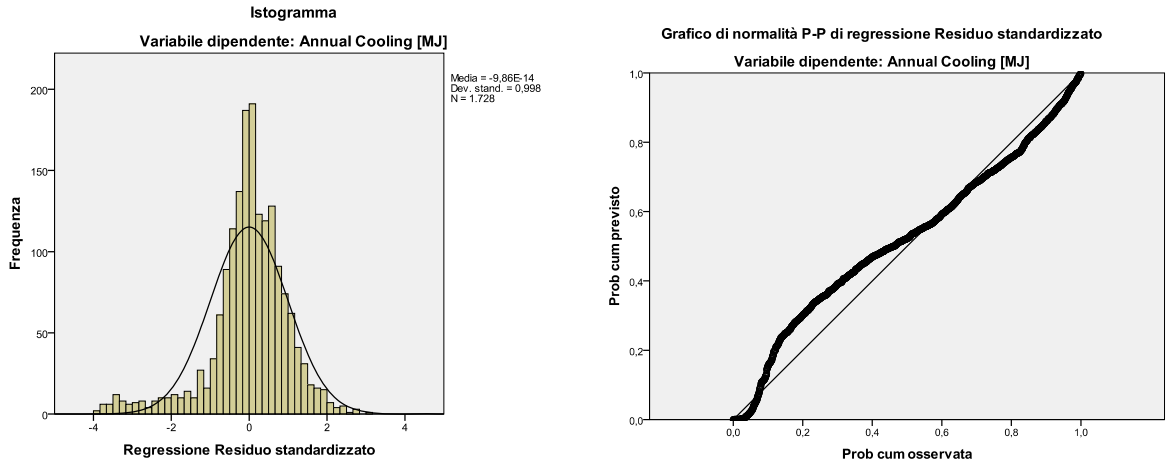


Figura 4.74– Istogramma e Grafico di normalità P-P dei residui

Dall'analisi dei residui e osservando sia *l'istogramma* che il *grafico di normalità P-P* in Figura 4.74 si può constatare che l'ipotesi di normalità è rispettata e che il primo modello può essere considerato lineare anche se in certi punti si discosta dalla retta di perfetta linearità del modello.

Secondo modello di regressione multivariata per i fabbisogni estivi

Nel secondo modello di regressione multivariata per i fabbisogni estivi si è deciso di inglobare la variabile *località (GG)* nelle variabili *dispersione vetri* e *dispersione superfici opache* ottenendo così l'energia dissipata in [W*d] attraverso le superfici vetrate e opache.

In Tabella 4.75 sono elencati i modelli di regressione lineare che prendono in considerazione queste nuove variabili, è possibile vedere che *l'indice di determinazione* R^2 dei modelli è superiore a quello dei modelli precedenti perché si sono messi in relazione i *gradi giorno* (fabbisogno termico dovuto alle variazioni esterne di temperatura) con le *dispersioni delle superfici opache e*

delle superfici vetrate, inoltre si vede che la variabile *Rad entr*ante è la più significativa fino al settimo modello, poi sparisce e la più significativa diventa la *Rad su sup opache*.

Tabella 4.75 - Riepilogo del modello[k]

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Deviazione standard Errore della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	Sig. Variazione di F	
1	,794[a]	,630	,630	2624,62419	,630	2942,365	1	1726	,000	
2	,853[b]	,727	,727	2254,40871	,097	614,428	1	1725	,000	
3	,872[c]	,760	,760	2115,30350	,033	235,336	1	1724	,000	
4	,881[d]	,776	,776	2043,29785	,016	124,648	1	1723	,000	
5	,894[e]	,799	,799	1936,71353	,023	195,864	1	1722	,000	
6	,904[f]	,818	,817	1843,72147	,019	179,086	1	1721	,000	
7	,913[g]	,833	,832	1767,43611	,015	152,768	1	1720	,000	
8	,913[h]	,833	,832	1767,12553	,000	,395	1	1720	,530	
9	,913[i]	,834	,833	1763,53784	,001	8,009	1	1720	,005	
10	,914[j]	,835	,834	1757,28575	,001	13,261	1	1719	,000	1,449

a. Predittori: (Costante), Rad entrante [MJ]

b. Predittori: (Costante), Rad entrante [MJ], Rad su sup opache

c. Predittori: (Costante), Rad entrante [MJ], Rad su sup opache, Disp vetri

d. Predittori: (Costante), Rad entrante [MJ], Rad su sup opache, Disp vetri, Disp opache W

e. Predittori: (Costante), Rad entrante [MJ], Rad su sup opache, Disp vetri, Disp opache W, Fattore solare

f. Predittori: (Costante), Rad entrante [MJ], Rad su sup opache, Disp vetri, Disp opache W, Fattore solare, Trasmittanza vetro

g. Predittori: (Costante), Rad entrante [MJ], Rad su sup opache, Disp vetri, Disp opache W, Fattore solare, Trasmittanza vetro, Disp vetri W

h. Predittori: (Costante), Rad su sup opache, Disp vetri, Disp opache W, Fattore solare, Trasmittanza vetro, Disp vetri W

i. Predittori: (Costante), Rad su sup opache, Disp vetri, Disp opache W, Fattore solare, Trasmittanza vetro, Disp vetri W, 1/(RC)

j. Predittori: (Costante), Rad su sup opache, Disp vetri, Disp opache W, Fattore solare, Trasmittanza vetro, Disp vetri W, 1/(RC), Disp opache

k. Variabile dipendente: Annual Cooling [MJ]

I coefficienti della variabili del modello sono contenuti in Tabella 4.76:

Tabella 4.76 - Coefficienti[a]

Modello		Coeff non std		Coeff std		Correlazioni			Statistiche di collinearità	
		B	Deviazione standard Errore	Beta	t	Ordine zero	Parziali	Parziali indipendenti	Tolleranza	VIF
1	(Cost)	1899,441	168,010		11,306					
	Rad entr	,341	,006	,794	54,244	,794	,794	,794	1,000	1,000
2	(Cost)	-9202,319	470,550		-19,557					
	Rad entr	,338	,005	,787	62,556	,794	,833	,786	,999	1,001
	Rad sup op	,013	,001	,312	24,788	,330	,512	,312	,999	1,001
3	(Cost)	-12427,708	489,021		-25,413					
	Rad entr[MJ]	,250	,008	,584	32,946	,794	,622	,389	,443	2,257
	Rad sup op	,015	,000	,365	29,674	,330	,581	,350	,920	1,087
	Disp vetri	219,776	14,326	,276	15,341	,638	,347	,181	,430	2,328
4	(Cost)	-6505,688	710,276		-9,159					
	Rad entr[MJ]	,237	,007	,552	31,780	,794	,608	,362	,431	2,321
	Rad sup op	,010	,001	,247	15,548	,330	,351	,177	,514	1,945
	Disp vetri	217,620	13,840	,273	15,724	,638	,354	,179	,430	2,328
	Disp op W	-,009	,001	-,177	-11,165	-,465	-,260	-,127	,517	1,935
5	(Cost)	-8826,822	693,354		-12,731					
	Rad entr[MJ]	,162	,009	,378	18,349	,794	,404	,198	,275	3,640
	Rad sup op	,010	,001	,239	15,850	,330	,357	,171	,513	1,948
	Disp vetri	280,822	13,874	,353	20,241	,638	,438	,219	,384	2,604
	Disp op W	-,011	,001	-,216	-14,144	-,465	-,323	-,153	,500	2,002
	Fatt solare	8953,417	639,751	,195	13,995	,485	,320	,151	,602	1,662
6	(Cost)	-8796,644	660,066		-13,327					
	Rad entr[MJ]	,063	,011	,146	5,583	,794	,133	,057	,154	6,481
	Rad sup op	,011	,001	,283	19,229	,330	,421	,198	,487	2,052
	Disp vetri	489,136	20,414	,614	23,960	,638	,500	,246	,161	6,221
	Disp op W	-,011	,001	-,227	-15,570	-,465	-,351	-,160	,498	2,008
	Fatt solare	16823,389	846,622	,366	19,871	,485	,432	,204	,311	3,212
	Trasm vetro	-5874,642	438,986	-,236	-13,382	,282	-,307	-,138	,339	2,952
7	(Cost)	-3600,179	759,697		-4,739					
	Rad entr[MJ]	,007	,012	,017	,629	,794	,015	,006	,132	7,603
	Rad sup op	,005	,001	,123	6,445	,330	,154	,064	,265	3,773
	Disp vetri	698,090	25,861	,877	26,994	,638	,546	,266	,092	10,863
	Disp op W	-,008	,001	-,155	-10,253	-,465	-,240	-,101	,425	2,355

	Fatt solare	20097,881	853,738	,437	23,541	,485	,494	,232	,281	3,555
	Trasm vetro	-6812,395	427,607	-,274	-15,931	,282	-,359	-,157	,328	3,048
	Disp vetri W	-,101	,008	-,331	-12,360	-,036	-,286	-,122	,135	7,402
8	(Cost)	-3533,829	752,198		-4,698					
	Rad sup op	,005	,001	,122	6,424	,330	,153	,063	,271	3,690
	Disp vetri	712,037	13,289	,894	53,582	,638	,791	,528	,349	2,869
	Disp op W	-,008	,001	-,155	-10,286	-,465	-,241	-,101	,425	2,352
	Fatt solare	20531,393	503,261	,447	40,797	,485	,701	,402	,809	1,236
	Trasm vetro	-6992,445	317,471	-,281	-22,025	,282	-,469	-,217	,595	1,681
	Disp vetri W	-,103	,008	-,338	-13,651	-,036	-,313	-,135	,158	6,309
9	(Cost)	-3236,436	757,990		-4,270					
	Rad sup op	,004	,001	,108	5,564	,330	,133	,055	,255	3,919
	Disp vetri	686,574	16,026	,862	42,842	,638	,718	,421	,239	4,190
	Disp op W	-,011	,001	-,219	-8,073	-,465	-,191	-,079	,131	7,639
	Fatt solare	20531,393	502,240	,447	40,880	,485	,702	,402	,809	1,236
	Trasm vetro	-6914,536	318,020	-,278	-21,742	,282	-,464	-,214	,591	1,693
	Disp vetri W	-,089	,009	-,293	-9,948	-,036	-,233	-,098	,112	8,950
	1/(RC)	3,064E8	1,083E8	,050	2,830	-,069	,068	,028	,308	3,248
10	(Cost)	-5837,829	1039,619		-5,615					
	Rad sup op	,008	,001	,188	6,431	,330	,153	,063	,113	8,882
	Disp vetri	666,205	16,920	,837	39,374	,638	,689	,386	,213	4,704
	Disp op W	-,008	,002	-,160	-5,052	-,465	-,121	-,050	,096	10,426
	Fatt solare	20531,393	500,459	,447	41,025	,485	,703	,402	,809	1,236
	Trasm vetro	-6772,028	319,300	-,273	-21,209	,282	-,455	-,208	,582	1,719
	Disp vetri W	-,081	,009	-,267	-8,864	-,036	-,209	-,087	,106	9,461
	1/(RC)	2,644E9	6,510E8	,433	4,062	-,069	,098	,040	,008	118,264
	Disp op	-58,209	15,985	-,420	-3,642	-,107	-,087	-,036	,007	138,224

a. Variabile dipendente: Annual Cooling [MJ]

Considerando i coefficienti delle variabili indipendenti inserite nel settimo modello possiamo stimare il fabbisogno estivo con la seguente equazione:

$$Q_{est\ stimato\ [MJ]} = -3600.179 + 0.007\ x_{Rad\_extr} + 0.005\ x_{Rad\_op} + 698.09\ x_{Disp\_vetro} - 0.008\ x_{Disp\_op[W]} + 20097.881\ x_{SHGC} - 6812.395\ x_{Ug\ vetro} - 0.101\ x_{Disp_{vetri}[W]}$$

Il settimo modello, pur essendo meno esplicativo (ma di poco) dei modelli che lo seguono, ha un senso fisico, a parte la variabile Disp Vetri che dovrebbe essere negativa. E' probabile che l'analisi statistica sia fuorviata dal legame tra il tipo di

vetro e il fattore solare, infatti quelli che disperdono meno sono anche quelli a basso fattore solare.

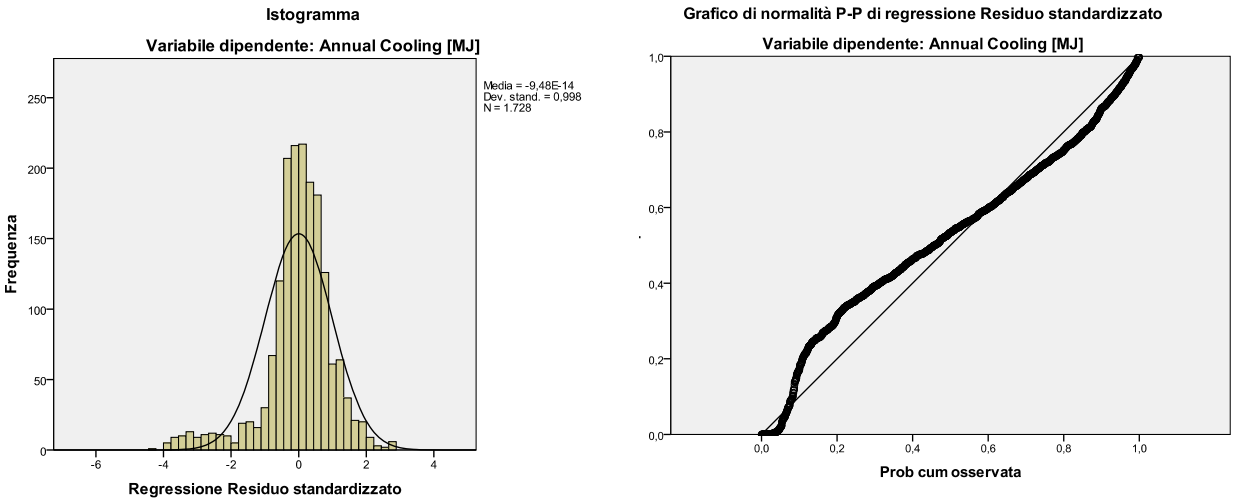


Figura 4.77 – Istogramma e Grafico di normalità P-P dei residui

Dall'analisi dei residui e osservando sia *l'istogramma* che il *grafico di normalità P-P* in Figura 4.77 si può vedere che l'ipotesi di normalità è rispettata e che la linearità di questo modello non è molto diversa da quella del primo anche se l'indice di determinazione maggiore ci dice che è un modello migliore.

Analizzando i grafici di regressione parziale dei fabbisogni estivi in relazione alle variabili indipendenti di quest'ultimo modello si può capire in che modo la variazione delle stesse incide nel fabbisogno estivo.
Nei grafici di regressione parziale di Figura 4.78-4.79-4.80 relativi alle variabili indipendenti *Dispersione sulle superfici vetrate, Fattore solare SHGC e Trasmittanza termica del vetro si* nota che è confermato l'andamento dei fabbisogni estivi osservato nella statistica descrittiva affrontata nel *Paragrafo 4.2.2*.

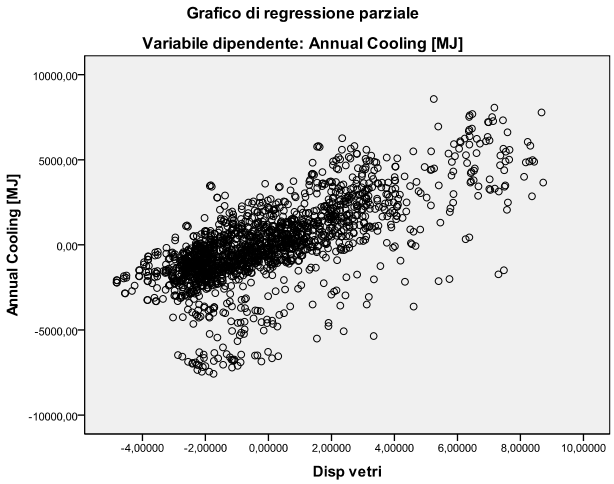


Figura 4.78

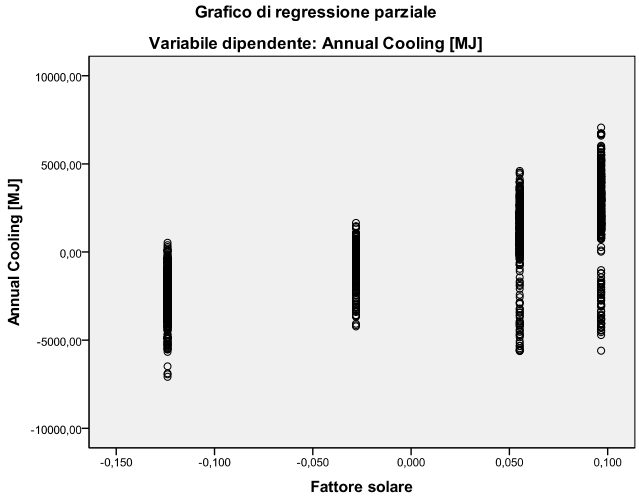


Figura 4.79

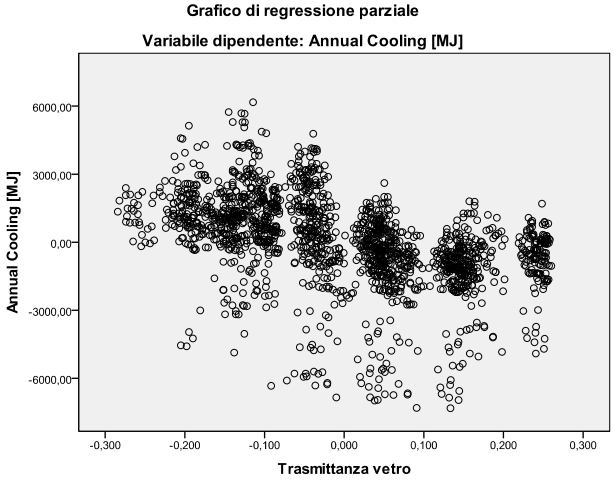


Figura 4.80

4.4 Conclusioni e commento dei risultati

I modelli scelti dalle analisi statistiche sono i seguenti:

Analisi Statistica 1, Fabbisogni Invernali

$$Q_{inv_{stimato}}\left[\frac{MJ}{GG}\right] = 7.138 - 0.629\, x_{spess\_iso} - 0.002\, x_{Rad\_Hor} + 0.11\, x_{orient_{fin}} - 0.075\, x_{sup\_vetrata} + 0.015\, x_{tipo\_edificio} + 0.124\, x_{tipo\_vetro.}$$

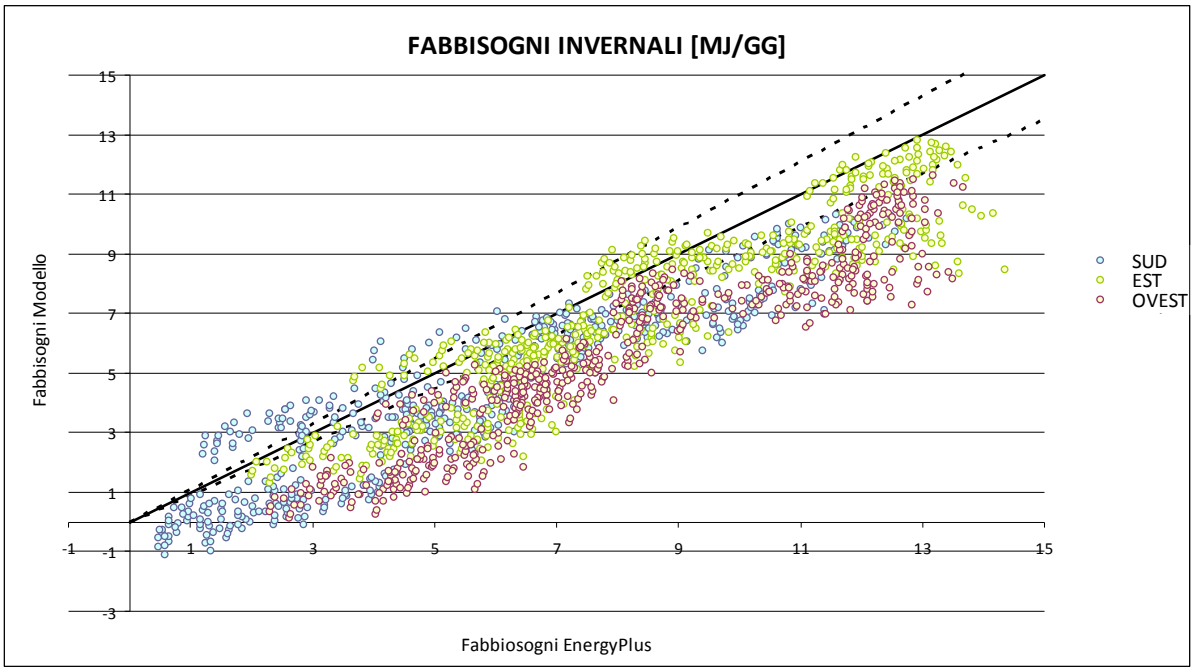


Grafico 4.81

Nel Grafico 4.81 sono stati confrontati i fabbisogni invernali ottenuti dalle simulazioni effettuate al software con i fabbisogni invernali dati dall'equazione del modello statistico trovato.

Dal grafico emerge che i valori dei fabbisogni invernali stimati attraverso l'equazione del modello non si discostano molto dai valori risultanti dalle simulazioni, ciò testimonia la bontà del modello statistico trovato, infatti i valori sono concentrati nell'intorno della bisettrice (±10%).

$$Q_{est\,stimato\,[MJ]} = 104578.405 + 513.601\,x_{sup\_vetrata} - 3.104\,x_{località} - 950.626\,x_{tipo\_vetro} + 70.597\,x_{spess\_iso} - 11.397\,x_{tipo\_edificio} + 14.461\,x_{orient_{fin}}$$

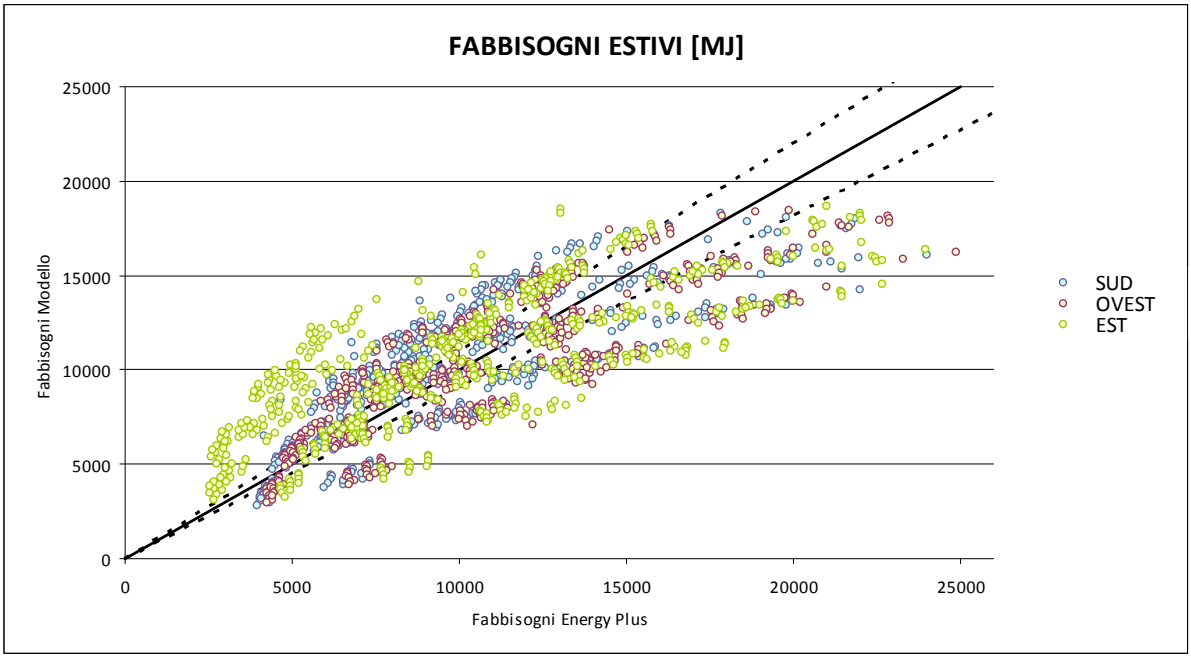


Grafico 4.82

Nel Grafico 4.82 sono stati confrontati i fabbisogni estivi ottenuti dalle simulazioni effettuate al software con i fabbisogni estivi stimati attraverso l'equazione del modello statistico trovato.

In questo caso si nota che i valori dei fabbisogni stimati con il modello statistico non coincidono molto con i valori dei fabbisogni ottenuti con le simulazioni perché non sono concentrati nella zona vicino alla bisettrice (±10%).

Analisi Statistica 2, Fabbisogni Invernali

$$Q_{inv_{stimato}}_{[MJ]} = 5491.762 + 0.077\, x_{Disp\_pp[W]} - 0.385\, x_{Rad\_entr} + 21073.749\, x_{Am/Ap} + 14398.701\, x_{SHGC} - 0.008\, x_{Rad\_pp} + 332.797\, x_{Disp\_vetro} - 4367.644\, x_{Ug\ vetro} + 71.026\, x_{Disp\_pp} - 2.749 \times 10^{6}\, x_{1/RC}$$

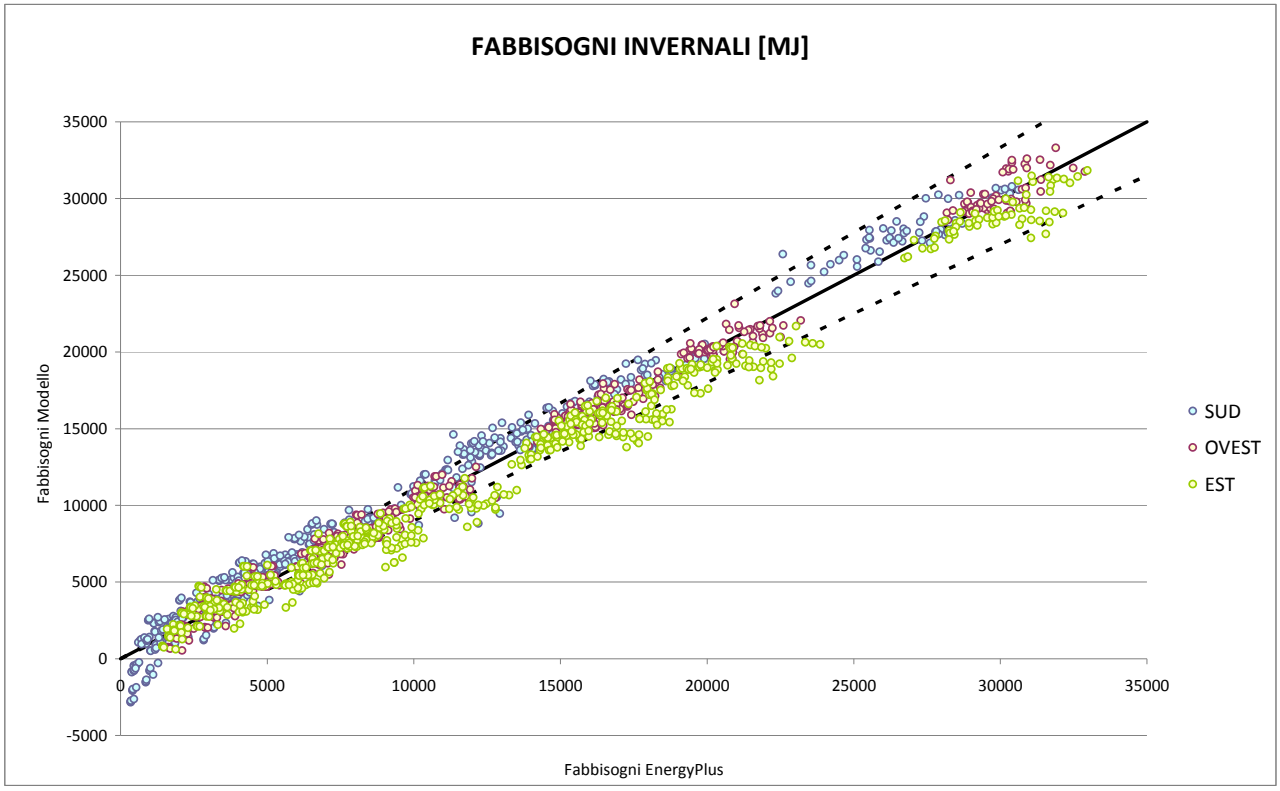


Grafico 4.83

Nel Grafico 4.83 sono stati confrontati i fabbisogni invernali ottenuti dalle simulazioni con i fabbisogni invernali dati dall'equazione del modello statistico ricavato dalla seconda analisi statistica.

Dal grafico emerge che i valori dei fabbisogni invernali stimati attraverso l'equazione del modello sono vicini valori risultanti dalle simulazioni, infatti i valori sono concentrati nell'intorno della bisettrice (±10%).

Questo conferma che il modello di stima dei fabbisogni invernali ottenuto dalla seconda analisi statistica è più preciso del modello di stima ottenuto dalla prima analisi statistica.

Analisi Statistica 2, Fabbisogni Estivi

$$Q_{est\ stimato\ [MJ]} = -3600.179 + 0.007\ x_{Rad\_estr} + 0.005\ x_{Rad\_op} + 698.09\ x_{Disp\_vetro} - 0.008\ x_{Disp\_op[W]} + 20097.881\ x_{SHGC} - 6812.395\ x_{Ug\ vetro} - 0.101\ x_{Disp_{vent}[W]}$$

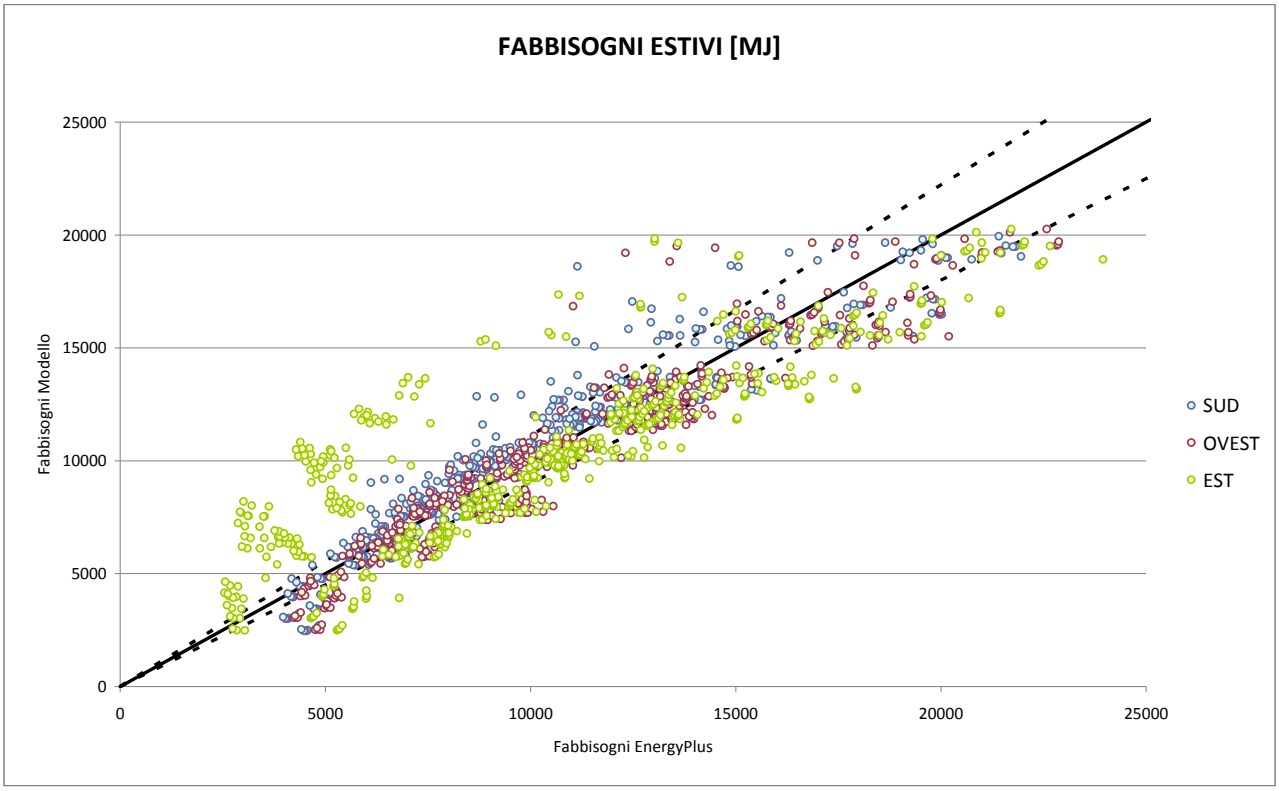


Grafico 4.83

Nel Grafico 4.84 sono stati confrontati i fabbisogni estivi ottenuti dalle simulazioni effettuate al software con i fabbisogni estivi ricavati dall'equazione del modello statistico derivante dalla seconda analisi statistica.

Anche i fabbisogni estivi stimati con il modello statistico ottenuto dalla seconda analisi si avvicinano molto ai valori ottenuti con le simulazioni al software e sono abbastanza concentrati nella zona vicino alla bisettrice (±10%).

Il grafico conferma che il modello di stima dei fabbisogni estivi della seconda analisi statistica è più preciso del modello di stima ottenuto nella prima analisi statistica anche se ci sono alcuni valori che non sono in linea con i risultati delle simulazioni.

L'elevata numerosità dei fattori presi in esame ha permesso di registrare alcune delle interazioni tra le variabili considerate, consentendo di realizzare delle analisi statistiche con elevata attendibilità.
Dalle statistiche descrittive svolte sono emersi i seguenti risultati:

- per quanto riguarda il periodo invernale i fattori che incidono maggiormente sul fabbisogno energetico per il riscaldamento sono la località, lo spessore di isolante e la dispersione attraverso le superfici opache.
- per quanto riguarda il periodo estivo i fattori che incidono maggiormente sul fabbisogno energetico per il raffrescamento sono la località, l'estensione delle superfici vetrate, la tipologia di vetro installata nelle finestre e la radiazione entrante dalle finestre.

Inoltre è stato possibile constatare che il fattore "tipologia di edificio" non risulta determinante né sulla determinazione dei fabbisogni invernali né sulla determinazione di quelli estivi perché essi hanno in entrambi i casi andamento costante.
Dalle analisi è emerso che per il fattore "orientazione prevalente" si hanno valori minori dei fabbisogni sia invernali che estivi se si sceglie l'orientazione a sud.

Con l'analisi statistica di regressione lineare multivariata si è potuto confermare e approfondire quanto emerso nelle statistiche descrittive.
Nella prima analisi statistica di regressione lineare multivariata, dai modelli di stima dei i fabbisogni invernali e dei fabbisogni estivi sono emerse le seguenti considerazioni:

- fabbisogno invernale, le variabili più determinanti sono la località, lo spessore di isolante e la radiazione orizzontale incidente sulle superfici dell'edificio;
- fabbisogno estivo, le variabili maggiormente incisive sul fabbisogno energetico di raffrescamento sono la località, la radiazione incidente sulle superfici orizzontali dell'edificio, l'estensione della superficie vetrata e la tipologia di vetro installata nei sistemi vetrati.

Nella seconda analisi statistica sono state considerate anche altre variabili e c'è stata la conferma di quanto emerso nella prima analisi:

- fabbisogno invernale, oltre alla località le variabili maggiormente significative sono la dispersione di calore attraverso le superfici opache, le dispersioni attraverso le superfici vetrate, il rapporto tra area vetrata e area del pavimento;
- fabbisogno estivo, nel fabbisogno estivo la variabile che maggiormente incide sulla richiesta energetica per il raffrescamento è la radiazione entrante attraverso le finestre unita alla dispersione delle superfici vetrate e al fattore solare SHGC dei vetri.

Infine i risultati ottenuti nell'analisi si possono riassumere con quanto segue:

- la variabile che incide maggiormente nella stima dei fabbisogni energetici invernali ed estivi è la località in cui è situato l'edificio, espressa in gradi giorno (GG), località con un valore elevato di GG saranno soggette a fabbisogni invernali maggiori e fabbisogni estivi minori rispetto ad una località con un valore di GG inferiore.
- L'orientazione preferenziale che consente di aver minor richiesta di energia per riscaldamento e raffrescamento è il sud.
- Installando vetri aventi un basso valore di guadagno termico solare (SHGC) abbasso il fabbisogno richiesto per il raffrescamento in regime estivo ma aumento il fabbisogno richiesto per il riscaldamento durante l'inverno.
- Accoppiando dei sistemi finestrati caratterizzati da un basso valore di trasmittanza termica e un elevato valore di coefficiente di guadagno termico solare (SHGC) ottengo buoni risultati durante il regime invernale perché c'è una diminuzione dei fabbisogni energetici, questo però porta un aumento dei fabbisogni durante il regime estivo.
- Un eccessivo aumento della superficie vetrata non porta buoni risultati né in regime invernale né in regime estivo perché i fabbisogni invernali sono influenzati negativamente dalla dispersione attraverso le superfici vetrate mentre i fabbisogni estivi sono influenzati negativamente dall'aumento della radiazione solare entrante.

CAPITOLO 5.

CONCLUSIONI

Per valutare l'influenza delle proprietà termo fisiche delle superfici vetrate sui fabbisogni invernali ed estivi di un involucro edilizio sono state svolte delle simulazioni dinamiche con il software *EnergyPlus*.
Tramite il software *Window5* sono stati creati i modelli delle finestre oggetto della nostra analisi, due con doppio vetro e due con triplo vetro facendo variare i valori di trasmittanza termica (livello "alto" pari a 1.1 W/m2K e livello "basso" tra 0.7e 0.9 W/m2K) e fattore solare (analogamente tra un livello "alto" di 0.5 circa e un livello "basso" di circa 0.3).

Nel piano delle simulazioni eseguito sono stati considerati 7 fattori: la località, la forma e orientazione della pianta dell'edificio, lo spessore dell'isolante (posizionato all'esterno della parete), l'estensione della superficie vetrata, l'orientazione preferenziale della superficie vetrata, la tipologia di vetro installata sulle finestre.
La combinazione di questi fattori considerati con la loro variabilità ha permesso di generare 2268 configurazioni di edificio, ne sono state studiate solo 1729 perché in certi casi la superficie vetrata prevista era superiore alla superficie della parete in cui doveva essere installata.

L'elevata numerosità dei fattori presi in esame ha permesso di osservare alcune delle interazioni tra le variabili prese in esame, consentendo di realizzare delle analisi statistiche con elevata attendibilità.
Sono stati fatti due tipi di analisi statistiche inferenziali con l'intento di ricostruire un modello lineare che mettesse in evidenza l'effetto di ciascuna delle variabili prese in esame sul fabbisogno:

- "Analisi Statistica 1": sono state studiate alcune delle variabili indipendenti che sono state considerate per la definizione del piano delle simulazioni (descritte nel Capitolo 2).

- "Analisi Statistica 2": sono state considerate altre variabili che descrivono da un punto di vista quantitativo le caratteristiche termo fisiche sia dell'involucro edilizio sia le condizioni ambientali.

Per entrambe le analisi statistiche è stata svolta prima un'analisi statistica descrittiva e successivamente un'analisi statistica di regressione lineare.

Dalle analisi statistiche descrittive svolte è emerso che i fattori che influenzano maggiormente l'andamento dei fabbisogni invernali sono: la *località*, espressa come valore dei gradi giorni (GG) della località stessa, lo *spessore di isolante* e la *dispersione di calore attraverso le superfici opache*.
Si ha un aumento del fabbisogno energetico richiesto per il riscaldamento dell'ambiente durante il periodo invernale all'aumentare del valore dei gradi giorno della località, diminuendo lo spessore di isolante applicato esternamente e con elevati valori di dispersione del calore attraverso le pareti.
In regime invernale installando dei vetri con trasmittanza termica alta (circa 1.1 W/m^2K) a basso guadagno termico solare SHGC (circa 0.3-0.4) si ha un netto peggioramento delle prestazioni dell'edificio perché sono maggiori le dispersioni attraverso le superfici vetrate e minori gli apporti di calore provenienti dalla radiazione solare entrante, è preferibile installare vetri con caratteristiche simili al *"Triplo SHGC Alto"*.

Per quanto riguarda i fabbisogni estivi sono state identificati come fattori determinanti la *località*, *l'estensione delle superfici vetrate*, la *tipologia di vetro* installata nelle finestre e la *frazione di radiazione solare entrante dalle finestre*.
La richiesta energetica per il raffrescamento dell'ambiente interno durante il periodo estivo diminuisce con l'aumentare dl valore dei gradi giorno caratteristici della località, aumenta all'aumentare dell'estensione delle superfici vetrate e quindi della radiazione solare entrante, diminuisce se vengono installati vetri caratterizzati da un basso valore del fattore solare SHGC.
In regime estivo se vengono installati vetri ad elevato guadagno termico solare (circa 0.5-0.6) il fabbisogno cresce perché la quota di radiazione solare entrante è maggiore e provoca un aumento di temperatura dell'ambiente interno, si deve perciò limitare la radiazione entrante attraverso i vetri installando vetri con caratteristiche simili al *"Doppio SHGC Basso"* e *"Triplo SHGC Basso"* preferendo

il triplo vetro perché caratterizzato da una minor trasmittanza termica che diminuisce le dispersioni attraverso le vetrate.

E' stato possibile constatare che il fattore *tipologia di edificio* (rapporto tra i lati della pianta e direzione prevalente in cui è sviluppato) non risulta significativo sulla determinazione dei fabbisogni invernali che hanno andamento pressoché costante; i fabbisogni estivi, a parità di rapporto tra i lati della pianta dell'edificio, sono minori nell'orientazione E/O rispetto all'orientazione N/S. .
Dalle analisi è emerso che per il fattore *orientazione prevalente delle superfici vetrate* si hanno valori minori dei fabbisogni sia invernali che estivi se si sceglie l'orientazione a sud.

Con l'analisi statistica di regressione lineare multivariata si è potuto confermare e approfondire quanto emerso nelle statistiche descrittive.
Dalla prima analisi statistica di regressione lineare multivariata, dai modelli di stima dei fabbisogni invernali e dei fabbisogni estivi sono emerse le seguenti considerazioni: in regime invernale il fabbisogno energetico cresce all'aumentare del valore dei gradi giorno della località mentre diminuisce all'aumentare della radiazione incidente sulle superfici orizzontali,si consideri che la radiazione sul piano orizzontale è maggiore nelle località caratterizzate da un basso valore dei gradi giorno; il fabbisogno in regime invernale aumenta se si diminuisce lo spessore di isolante perché diminuisce la resistenza termica della parete e aumentano le dispersioni.
Durante il periodo estivo il fabbisogno energetico per il raffrescamento diminuisce all'aumentare del valore dei gradi giorno della località, maggiore è la superficie vetrata e maggiore è il fabbisogno richiesto in relazione con la tipologia di vetro installata: vetri con guadagno solare SHGC basso riducono la radiazione entrante e quindi la richiesta di energia per il raffrescamento, rispetto a vetri con guadagno solare alto.

Nella seconda analisi statistica sono state considerate anche altre variabili che descrivono da un punto di vista quantitativo le caratteristiche termo fisiche sia dell'involucro edilizio sia le condizioni ambientali, c'è stata la conferma di quanto emerso nella prima analisi: per quanto riguarda il fabbisogno invernale oltre alla

località le variabili maggiormente significative sono la dispersione di calore attraverso le superfici opache, le dispersioni attraverso le superfici vetrate, il rapporto tra area vetrata e area del pavimento, è intuitivo affermare che un aumento della dispersione del calore attraverso le superfici vetrate e attraverso quelle opache provoca un aumento del fabbisogno energetico richiesto.
Nel caso del fabbisogno estivo la variabile che maggiormente incide sulla richiesta energetica per il raffrescamento è la radiazione entrante attraverso le finestre unita alla dispersione delle superfici vetrate e al fattore solare SHGC dei vetri, vetri caratterizzati da un basso valore del coefficiente di guadagno solare "bloccano" maggiormente la radiazione solare permettendo una riduzione della radiazione solare entrante e quindi del riscaldamento dell'ambiente con conseguente diminuzione della richiesta energetica per il raffrescamento dell'ambiente.

I risultati ottenuti nell'analisi, per quanto riguarda l'influenza delle componenti vetrate sull'andamento dei fabbisogni energetici durante il periodo invernale e durante quello estivo, si possono riassumere con quanto segue:

- Installando vetri aventi un basso valore di guadagno termico solare (SHGC) abbasso il fabbisogno richiesto per il raffrescamento in regime estivo perché diminuisco la radiazione solare entrante ma aumento il fabbisogno richiesto per il riscaldamento durante l'inverno perché sfrutto meno il calore derivante dalla radiazione solare. Un guadagno solare SHGC basso è preferibile, quindi, durante i periodi estivi mentre durante i periodi invernali è suggerito un vetro con guadagno solare SHGC alto per sfruttare quanto più possibile la radiazione incidente sulle finestre.
  A seconda della località in cui mi trovo è preferibile installare una tipologia di vetro piuttosto che un'altra perché località che hanno un valore di gradi giorno diverso hanno esigenze e problematiche diverse.
  A Milano è consigliabile installare vetri ad elevato guadagno solare per usufruire il più possibile dell'energia termica derivante dalla radiazione solare entrante nel periodo invernale, penalizzando meno le prestazioni in regime estivo impiegando eventualmente dei sistemi di schermatura mobile.

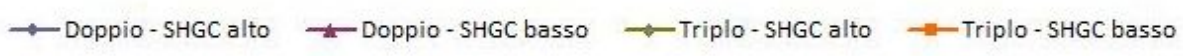
A Messina invece è preferibile installare un vetro con guadagno solare basso per non penalizzare le prestazioni dell'edificio e dover richiedere maggior energia in regime estivo, visto che (per questa località) le prestazioni in regime invernale non sono influenzate in modo significativo dalla tipologia di vetro.

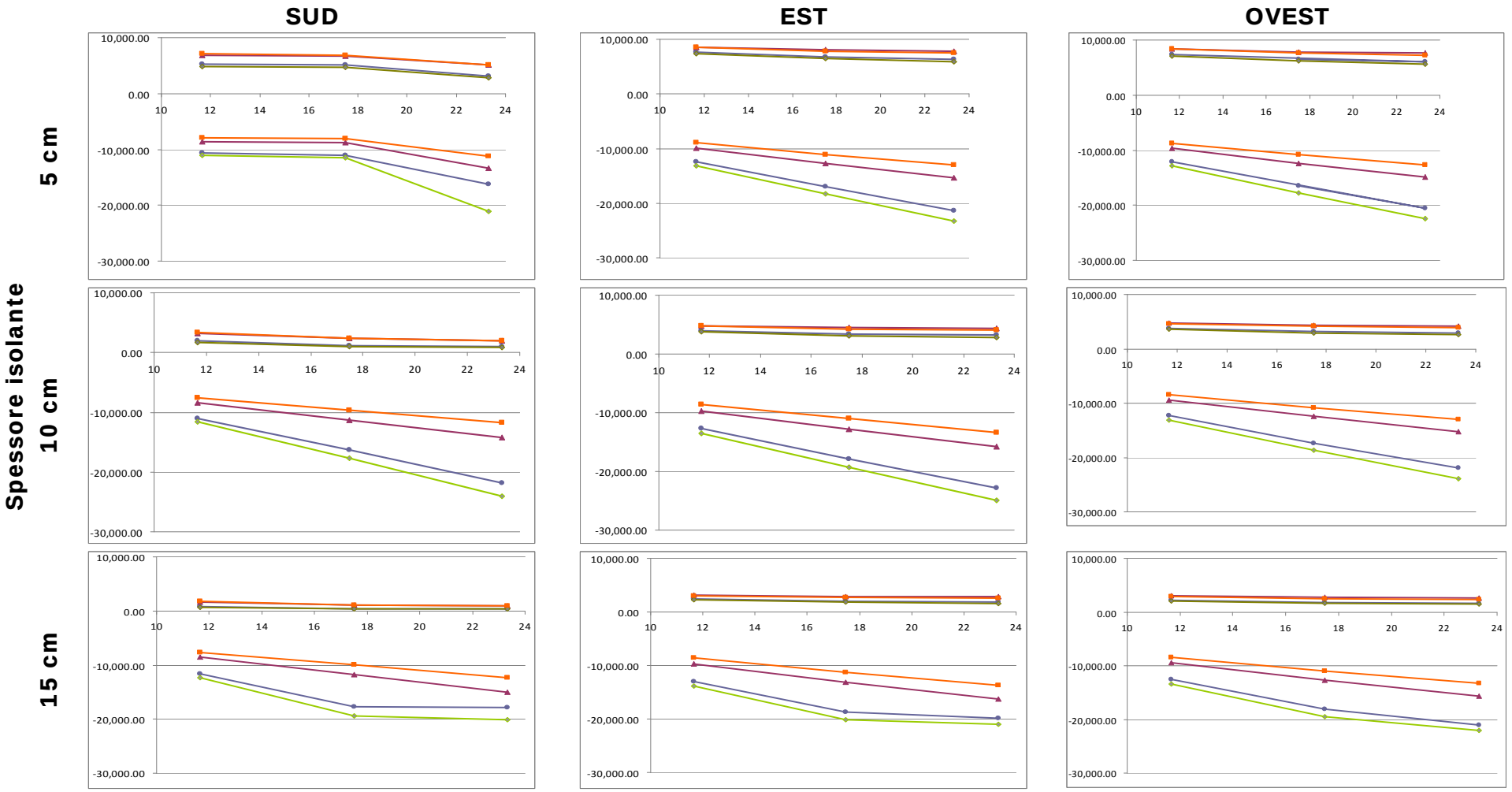
- Accoppiando dei sistemi finestrati caratterizzati da un basso valore di trasmittanza termica e un elevato valore di coefficiente di guadagno solare (SHGC) ottengo buoni risultati durante il regime invernale perché c'è una diminuzione dei fabbisogni energetici in quanto limito la dispersione termica delle superfici vetrate e aumento il carico energetico derivante della radiazione solare entrante, questo però porta un aumento dei fabbisogni durante il regime estivo.
- L' aumento della superficie vetrata sulla superficie del pavimento dal 17.49% al 23.32% non porta buoni risultati in regime estivo per le località Roma e soprattutto Messina perché i fabbisogni estivi sono influenzati negativamente dall'aumento della radiazione solare entrante che provoca un innalzamento della temperatura interna e quindi maggior richiesta energetica per il raffrescamento (a Milano questo fenomeno c'è ma è meno evidente rispetto alle località meridionali); in regime invernale le dispersioni attraverso le superfici vetrate che aumentano incrementando l'involucro trasparente non provocano grandi perdite energetiche perché bilanciate dagli apporti di calore dovuti alla radiazione solare entrante.

Le osservazioni fatte sono riscontrabili nelle seguenti tabelle: Tabella 5.1, Tabella 5.2 e Tabella 5.3 in cui sono riportati gli andamenti dei fabbisogni invernali (+) ed estivi (-) per le località Messina, Roma e Milano, per gli edifici a pianta quadrata, ottenuti dalle simulazioni.

Le tabella hanno struttura matriciale, sulle righe ci sono i tre diversi spessori di isolante e sulle colonne le tre orientazioni preferenziali delle superfici finestrate.

I grafici ottenuti nell'intersezione tra righe e colonne della matrice permettono di confrontare le quattro tipologie di vetro analizzate, in ascissa si considera l'estensione della superficie finestrata mentre in ordinata ci sono i fabbisogni invernali (+) ed estivi (-) espressi in [MJ].





Orientazione preferenziale delle superfici vetrate

Tabella 5.1 – Messina: Andamento dei fabbisogni invernali ed estivi

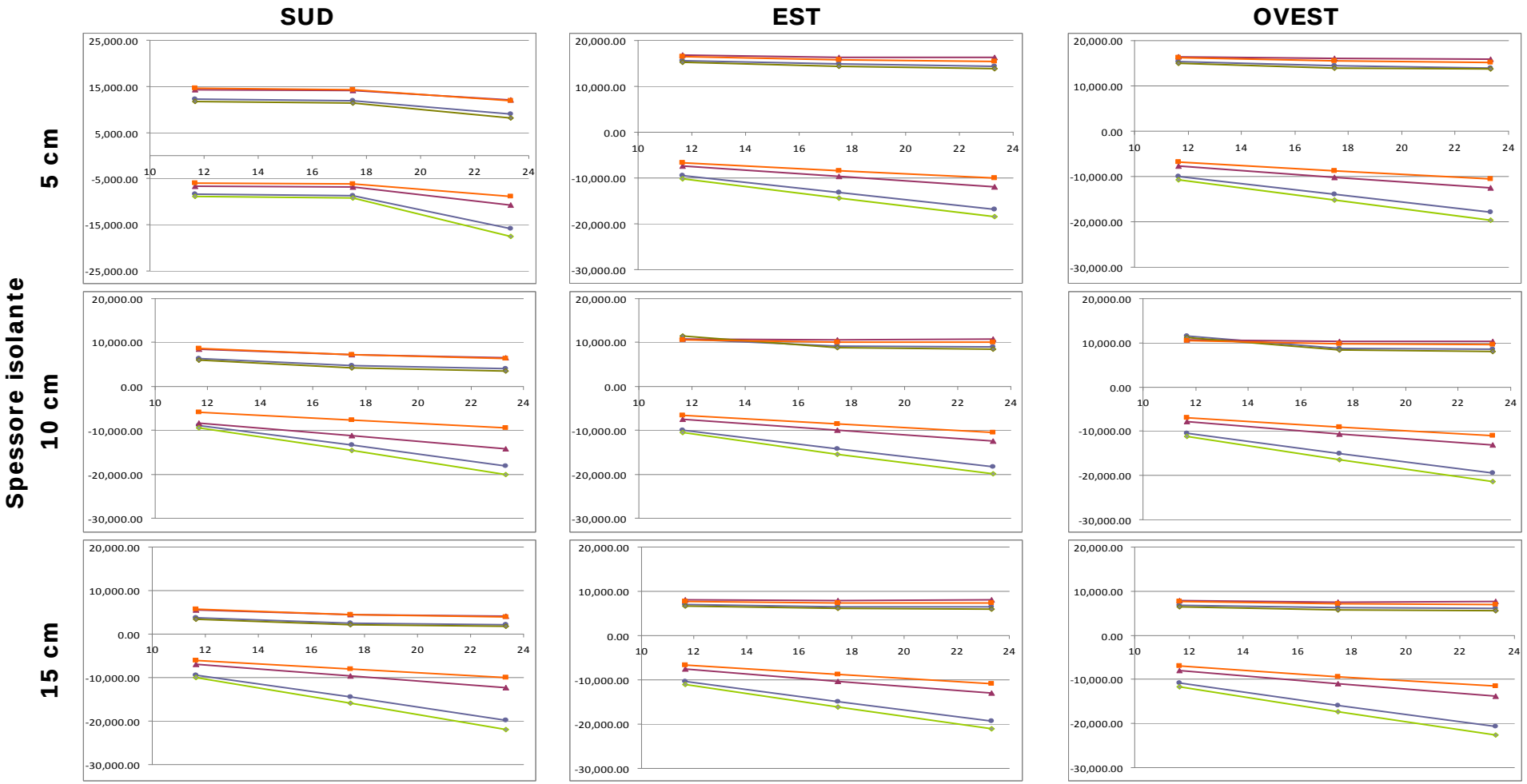


Tabella 5.2 – Roma: Andamento dei fabbisogni invernali ed estivi

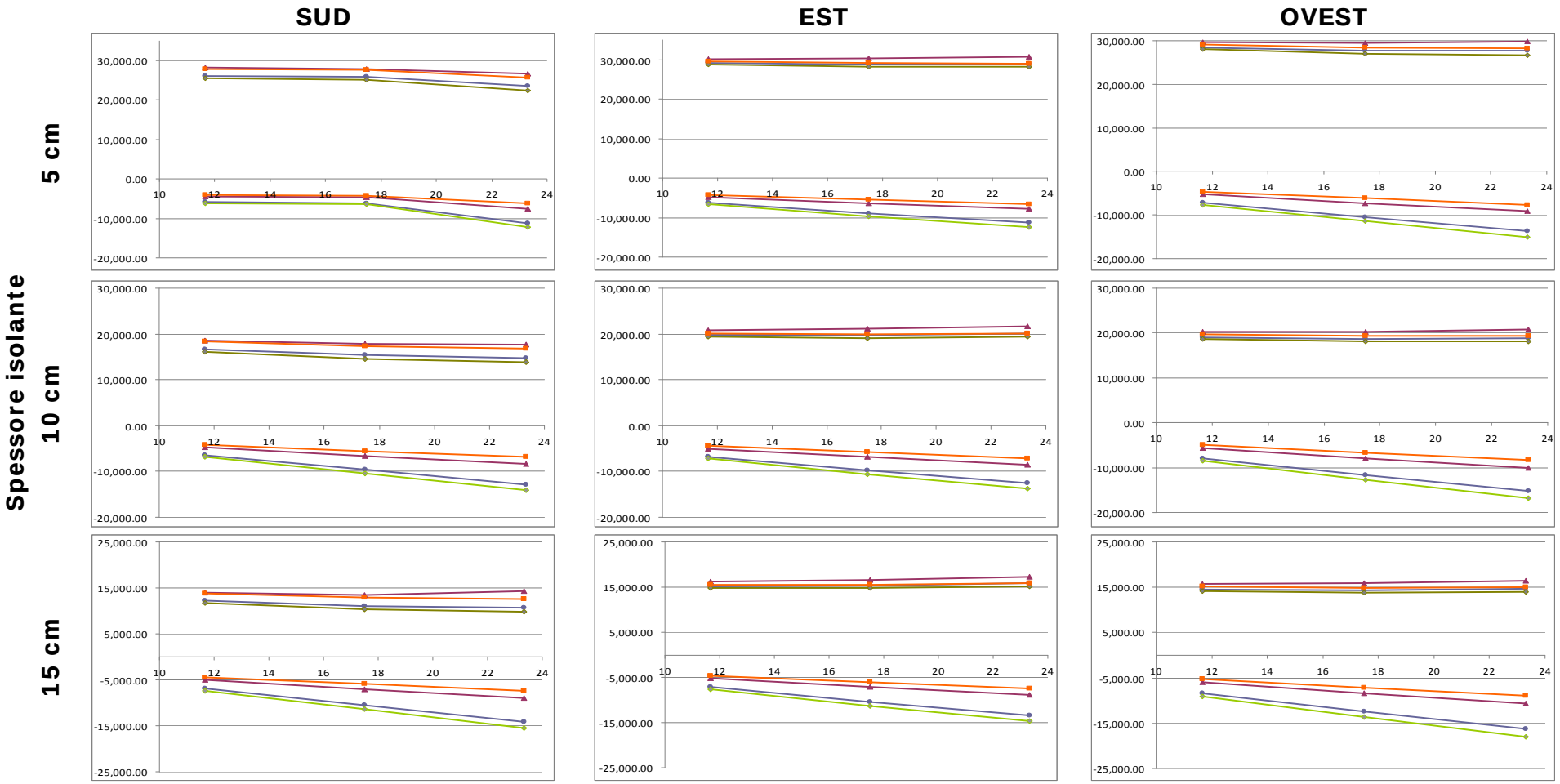


Tabella 5.3 – Milano: Andamento dei fabbisogni invernali ed estivi

BIBLIOGRAFIA

Tesi e articolo scientifici

1. M.K. Urbikain, J.M. Sala, *Analysis of different models to estimate Energy saving related to windows in residential buildings*, Energy and Buildings 41 (2009).

2. Analisi del comportamento dinamico dell'involucro edilizio: metodologie di calcolo e determinazione delle prestazioni estive, *Università degli studi di Padova, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali*, Laureando: Pernigotto G., Relatore: Gasparella A., Correlatori: Baggio P., Baratieri M., a.a. 2008 - 2009.

3. Modelli di simulazione dinamica degli edifici: analisi comparativa e impiego nella valutazione del fabbisogno energetico invernale ed estivo, *Università degli studi di Padova, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali*, Laureando: Baldo D., Relatore: Gasparella A., Correlatore: Pernigotto G., a.a. 2009 - 2010.

4. Baggio P., Cappelletti F., Gasparella A., Romagnoni P., *Dependence of the Energy need of residential buildings on the features of the glazing systems,* Atti del convegno Clima 2010, 10th REHVA World Congress, 9-12 Maggio 2010, Antalya, Turchia

5. Gasparella A., Pernigotto G., Cappelletti F., Romagnoni P., Baggio P., *Analysis and modelling of the Energy performance of window and glazing systems*, 65° Congresso Nazionale ATI – Domus de Maria (CA), 13-17 Settembre 2010.

6. Gasparella A., Pernigotto G., *Analisi comparativa dei codici di simulazione dinamica degli edifici: un confronto tra Trnsys ed EnergyPlus*, 65° Congresso Nazionale ATI – Domus de Maria (CA), 13-17 Settembre 2010.

7. Norbert Lantschner, *KlimaHaus (CasaClima) – Vivere nel più*, Terza Edizione, Edition Raetia 2006.

8. Norbert Lantschner, *KlimaHaus (CasaClima) – Il piacere di abitare*, Athesia 2008.

9. Norbert Lantschner, *Manuale CasaClima – Risanare Oggi*, Agenzia CasaClima, 2008.

Normativa

1. UNI 10349 (1994): Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati Climatici.
2. UNI EN ISO 10077-1 (2007): Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità.
3. UNI/TS 11300-1 (2008): Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.
4. UNI EN ISO 13790 (2008): Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento.
5. DM 26 Giugno 2009 *"Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici".*
6. DL 311 del 29/12/2006 *"Disposizioni correttive e integrative al DL 192/05, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia".*
7. D.P.R n°412, 26 Agosto 1993, *"Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia".*
8. Legge 10/91 *"Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia".*
9. DL n°192 del 19 Agosto 2005 *"Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia".*

10. *"Pacchetto clima-energia, obbiettivo 20/20/20"*, Dicembre 2008, Parlamento Europeo.

Manuali

1. Manuale di EnergyPlus: Getting Started with EnergyPlus (2009).
2. Manuale di EnergyPlus: EnergyPlus Engineering References (2009).
3. Manuale di EnergyPlus: Auxiliary EnergyPlus Programs (2009).
4. Manuale di Window5: WINDOW5 User Manual (2001).
5. Manuale di SPSS Statistics 18.0.

Siti internet consultati

1. http://windows.lbl.gov/software/window/window.html
2. http://ec.europa.eu/climateaction/eu_action/index_it.html
3. http://ec.europa.eu/cgi-bin/etal.pl
4. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/210
5. http://www.vienergia.it